



BLUE SKY SOLUTIONS GmbH Dipl.-Ing. Norbert Alexander Pilz Managing Director Fakultät V Verkehrs- und Maschinensysteme Institut für Mechanik Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Zehn Fachgebiet Strukturmechanik und -berechnung

Diplomarbeit

CAD- und FEM-basierte Optimierung eines Mechanismus zur kontrollierten Trennung von Nutzlasten und Stufen

Cihan Ünlü

05. Juni 2018

Externer Betreuer und Gutachter: Dipl.-Ing. Norbert Alexander Pilz BLUE SKY SOLUTIONS GmbH

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Zehn

Zweitgutachter: Dr.-Ing. Dragan Marinkovic

Ersteller: Cihan Ünlü Matr.-Nr.: 308886 Abgabedatum: 05.06.2018 Ort: Berlin

[Die Diplomarbeit wird am Fachgebiet für Strukturmechanik und Strukturberechnung an der TU-Berlin in Kooperation mit der Firma Blue Sky Solutions GmbH durchgeführt.]



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe bzw. ohne Benutzung anderer als die der angegebenen Hilfsmittel angefertigt, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet, die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Titel der schriftlichen Arbeit

CAD- und FEM-basierte Optimierung eines Mechanismus zur

kontrollierten Trennung von Nutzlasten und Stufen

Verfasser

| Name | Vorname | MatrNr.: |
|------|---------|----------|
| Ünlü | Cihan | 308886 |

Berlin, 05.06.2018

Ort, Datum

Unterschrift*

*Mit meiner Unterschrift bürge ich für den vollumfänglichen Inhalt der Endversion dieser schriftlichen Arbeit.

CAD- und FEM-basierte Optimierung eines Mechanismus zur kontrollierten Trennung von Nutzlasten und Stufen



[CAD-Design des optimierten Trennungssystems]

Inhaltsverzeichnis

| | ١. | Ab | bildungsverzeichnis | 0 |
|---|------|-------|---------------------------------------------------------------|----|
| | II. | Tal | bellenverzeichnis | 2 |
| | III. | | Abkürzungsverzeichnis | 3 |
| | IV. | I | Übersetzungsverzeichnis | 3 |
| | V. | Fo | rmelverzeichnis | 3 |
| | VI. | I | Kurzzusammenfassung | 4 |
| 1 | E | inle | itung | 5 |
| | 1.1 | I | Einführung in die Thematik | 6 |
| | 1.2 | ` | Vorstellung bestehender Systeme | 6 |
| | 1.3 | I | Einsatzorte von Trennmechanismen | 8 |
| 2 | C | CAD- | basierte Optimierung des bestehenden Entwurfs 1 | .0 |
| | 2.1 | , | Vorstellung des bestehenden Entwurfs 1 | .1 |
| | 2 | 2.1.1 | Vorstellung der Funktionsweise des Trennmechanismus1 | .1 |
| | 2 | 2.1.2 | Vorstellung der Subsysteme1 | .4 |
| | 2.2 | (| CAD-basierte Optimierung auf Komponentenebene des Entwurfs1 | .5 |
| | 2 | 2.2.1 | Optimierung der Backe 1 | .5 |
| | 2 | .2.2 | Optimierung der Klammer 1 | 6 |
| | 2 | .2.3 | Optimierung der Klammerhalterung1 | 7 |
| | 2 | 2.2.4 | Optimierung der Scharnierhalterung 1 | .8 |
| | 2 | .2.5 | Optimierung des Scharniers 1 | .9 |
| | 2 | .2.6 | Optimierung des Halterings 2 | 0 |
| | 2 | .2.7 | Optimierung der Distanzmuffe 2 | 1 |
| | 2 | .2.8 | Optimierung der Haltescheibe 2 | 1 |
| | 2 | .2.9 | Optimierung des Bronzestabs | 2 |
| | 2 | 2.2.1 | 0 Optimierung des Hauptrings 2 | 3 |
| | 2 | .2.1 | 1 Optimierung des oberen Trennrohrs 2 | 4 |
| | 2 | 2.2.1 | 2 Optimierung des unteren Trennrohrs 2 | 5 |
| | 2.3 | (| CAD-basierte Optimierung bestehender Entwürfe auf Systemebene | 6 |
| | 2 | .3.1 | Optimierung der Führungsschiene2 | 7 |
| | 2 | .3.3 | Optimierung der Gasdruckfeder 2 | 9 |
| | 2 | .3.4 | Optimierung des Gasdrucktanks | 0 |
| | 2 | .3.6 | Optimierung des pneumatischen Anschlusses | 1 |
| | 2 | .3.7 | Optimierung der Trennverbindung | 2 |

| | 2.3.8 | 8 Optimierung des Trennmechanismus | 33 |
|---|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| | 2.4 | Zusammenfassung des CAD-basierten Optimierungsprozesses | 33 |
| 3 | FEM | I-basierte Validierung des überarbeiteten Entwurfs | 34 |
| | 3.1 | Identifizierung und Auswahl kritisch belasteter Bauteile | 34 |
| | 3.2 | FEM-basierte Analyse ausgewählter Bauteile | 34 |
| | 3.2.2 | 2 Zuweisung der Materialeigenschaften des Haupt- und Halterings | 36 |
| | 3.2.2 | 2 Erstellung der Netzstruktur des Haupt- und Halterings | 36 |
| | 3.2.3 | 3 Zuweisung von Lasten | 38 |
| | 3.2.4 | 4 FEM-Analyse des Hauptrings | 40 |
| | 3.2.5 | 5 FEM-Analyse des Halterings | 41 |
| | 3.2.6 | 6 FEM-Analyse des Hauptrings bei verschiedenen Wandstärken | 42 |
| | 3.2.7 | 7 Adaptive Netzverfeinerung des Haupt- und Halterings | 43 |
| | 3.2.8 | 8 Zusammenfassung aller Ergebnisse der FEM-Simulation | 45 |
| | 3.3 | Zusammenfassung des FEM-basierten Validierungsprozesses | 45 |
| 4 | Besc | chaffung und Fertigung | 47 |
| | 4.1 | Fertigung von Fertigungsteilen | 47 |
| | 4.1.1 | 1 Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile | 48 |
| | 4.1.2 | 2 Betriebsfehler beim Fertigen | 50 |
| | 4.2 | Beschaffung von Kaufteilen | 52 |
| | 4.3 | Beschaffung von Normteilen | 53 |
| 5 | Mor | ntage, Integration und Test | 54 |
| | 5.1 | Montage auf Komponentenebene | 54 |
| | 5.1.2 | Zusammenfügen der Bronzegleitlager für die Lagerung der Edelstahlwellen | 54 |
| | 5.1.2 | 2 Zusammenbau der Klemmmechanik | 55 |
| | 5.1.3 | 3 Zusammenbau der oberen Trennungseinheit | 55 |
| | 5.2 | Integration auf Systemebene | 56 |
| | 5.2.2 | 1 Vorstellung der oberen Trennungseinheit | 57 |
| | 5.2.2 | 2 Vorstellung des unteren Testzylinders | 58 |
| | 5.3 | Tests auf Subsystemebene | 59 |
| | 5.3.2 | 1 Ausfahrtest der oberen Trennungseinheit | 59 |
| | 5.3.2 | 2 Ausfahrtest der unteren Trennungseinheit | 60 |
| | 5.4 | Tests auf Systemebene | 60 |
| 6 | Zusa | ammenfassung und Ausblick | 62 |
| | 6.1 | Zusammenfassung | 62 |

| | 6.2 | Ausblick | 63 |
|---|-------|------------------|----|
| 7 | Liter | raturverzeichnis | 65 |
| 8 | Anh | ang | 66 |

I. Abbildungsverzeichnis

| Abb. 1.1: Bestehender CAD-Entwurf | 5 |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1.2: CAD-Modell von SPL (geschlossen) [1] | 7 |
| Abb. 1.3: Testmodell von SPL (offen) [2] | 7 |
| Abb. 1.4: Trennmechanismus SPL (geschlossen) [2] | 7 |
| Abb. 1.5: Trennmechanismus SPL (offen) [2] | 7 |
| Abb. 1.6: Falcon 9 von SpaceX© [2] | 8 |
| Abb. 2.1: Baugruppenansicht | 10 |
| Abb. 2.2: Bestehender CAD-Entwurf (oben) | 12 |
| Abb. 2.3: Bestehender CAD-Entwurf (unten) | 12 |
| Abb. 2.4: Backen-Klammer-Halterungssystem | 12 |
| Abb. 2.5: Geschlossen | 13 |
| Abb. 2.6: Geöffnet | 13 |
| Abb. 2.7: Getrennt | 13 |
| Abb. 2.8: Übersicht der Baugruppen des bestehenden CAD-Entwurfs | 14 |
| Abb. 2.9: Übersicht der Subsysteme des optimierten Trennungssystems | 26 |
| Abb. 2.10: Lineargleitlager W-Profil | 27 |
| Abb. 2.11: Linearrollenlager | 27 |
| Abb. 2.12: Schnittansicht Lineargleitlager | 28 |
| Abb. 2.13: Linearführungsadapter (Vorderseite) | 28 |
| Abb. 2.14: Linearführungsadapter (Rückseite) | 28 |
| Abb. 2.15: Gaskolbenfeder mit Freiheitsgrad | 29 |
| Abb. 2.16: Gaskolbenfeder ohne Freiheitsgrad | 29 |
| Abb. 2.17: Gasdrucktank mit Klammern | |
| Abb. 2.18: Gasdrucktank mit Winkel | |
| Abb. 2.19: Schnittstelle für Pneumatik | 31 |
| Abb. 2.20: Pneumatischer Anschluss | 31 |
| Abb. 2.21: Kontaktfläche | 32 |
| Abb. 2.22: Linienlast | 32 |
| Abb. 2.23: Vorentwurf isometrisch | |
| Abb. 2.24: Neuentwurf isometrisch | 33 |
| Abb. 3.1: Auswahl der Bauteile zur FEM-Analyse | 35 |
| Abb. 3.2: Eingabe der Approximationskonstante GSI | 35 |
| Abb. 3.3: Flächenlast der 2 elektr. Linearmotoren am Hauptring | 38 |
| Abb. 3.4: Flächenlast der 4 Gasdruckfedern | |
| Abb. 3.5: Flächenlast der 2 elektr. Linearmotoren am Haltering | 39 |
| Abb. 3.6: Verformungssimulation des Hauptrings | 40 |
| Abb. 3.7: Verformungssimulation des Halterings | 41 |
| Abb. 3.8: FEM-Analyse des halbierten Hauptrings | 43 |

| Abb. 3.9: Haltering mit adaptiver Netzverfeinerung | 44 |
|----------------------------------------------------|----|
| Abb. 4.1: Unterkante des oberen Trennrohrs | 51 |
| Abb. 4.2: Oberseite des oberen Trennrohrs | 51 |
| Abb. 5.1: KH - GL | 54 |
| Abb. 5.2: Scharnier - GL | 54 |
| Abb. 5.3: Klammer | 54 |
| Abb. 5.4: SH | 54 |
| Abb. 5.5: Klemmstrang | 54 |
| Abb. 5.6: Vermessung der Achsen | 55 |
| Abb. 5.7: Haltering mit 8 Klemmsträngen | 55 |
| Abb. 5.8: Oberes Trennrohr und Haltering | 56 |
| Abb. 5.9: Überprüfung der Kinematik | 56 |
| Abb. 5.10: Integrationsschritt I | 57 |
| Abb. 5.11: Integrationsschritt II | 57 |
| Abb. 5.12: Integrationsschritt III | 57 |
| Abb. 5.13: Obere Trennungseinheit | 58 |
| Abb. 5.14: Testzylinder | 58 |
| Abb. 5.15: Pneumatisches System | 58 |
| Abb. 5.16: Ausfahrtest - 0 Sekunden | 59 |
| Abb. 5.17: Ausfahrtest - 9 Sekunden | 59 |
| Abb. 5.18: Ausfahrtest - 18 Sekunden | 59 |
| Abb. 5.19: Ausfahrtest - 0 Sekunden | 60 |
| Abb. 5.20: Ausfahrtest - 0,1 Sekunden | 60 |
| Abb. 5.21: Ausfahrtest - 0,2 Sekunden | 60 |
| Abb. 5.22: Positionierung | 61 |
| Abb. 5.23: Ausrichtung | 61 |
| Abb. 5.24: Befestigung | 61 |
| Abb. 5.25: Beschleunigungstest I | 61 |
| Abb. 5.26: Beschleunigungstest II | 61 |
| Abb. 5.27: Beschleunigungstest III | 61 |

II. Tabellenverzeichnis

| Tabelle 2-1: Stückliste des bestehenden CAD-Entwurfs | 11 |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2-2: Backe | 15 |
| Tabelle 2-3: Klammer | 16 |
| Tabelle 2-4: Klammerhalterung | 17 |
| Tabelle 2-5: Scharnierhalterung | |
| Tabelle 2-6: Scharnier | 19 |
| Tabelle 2-7: Haltering | 20 |
| Tabelle 2-8: Distanzmuffe | 21 |
| Tabelle 2-9: Haltescheibe | 21 |
| Tabelle 2-10: Bronzestab | 22 |
| Tabelle 2-11: Hauptring | 23 |
| Tabelle 2-12: Oberes Trennrohr | 24 |
| Tabelle 2-13: Unteres Trennrohr | 25 |
| Tabelle 3-1: Übersicht zur Erstellung der Netzstruktur des Hauptrings | 37 |
| Tabelle 3-2: Übersicht zur Einstellung der Netzstruktur des Halterings | 37 |
| Tabelle 3-3: FEM-Simulation des Hauptrings mit versch. Wandstärken | 42 |
| Tabelle 3-4: Zusammenfassung aller Ergebnisse | 45 |
| Tabelle 4-1: Fertigungsteile | 47 |
| Tabelle 4-2: Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile | 48 |
| Tabelle 4-3: Kaufteile | 52 |
| Tabelle 4-4: Normteile | 53 |
| | |

III. Abkürzungsverzeichnis

| CAD | Computer Aided Design (Rechenunterstütztes Designen) |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| EN | Europa Norm |
| FEM | Finite Element Methode |
| GSI | Golbal Size Index, eine globale Approximationskonstante zur Netzerstellung |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ISS | International Space Station |
| LLC | Limited Liability Company |
| ОТ | Obere Trennungseinheit |
| SPL | Swiss Propulsion Laboratory GmbH |
| St. | Status |
| ТМ | Trennungsmechanik |
| UT | Untere Trennungseinheit |

IV. Übersetzungsverzeichnis

| Fremdwort | Übersetzung | Sprache |
|---------------------|-----------------------|----------|
| hold, to hold | halten, festhalten | Englisch |
| release, to release | loslassen, entriegeln | Englisch |

V. Formelverzeichnis

| Zeichen | Einheit | Beschreibung |
|------------------|---------|--------------------------------------------|
| E | [N/mm²] | E-Modul, Elastizitätsmodul |
| F | [N] | Kraft |
| F _{GDF} | [N] | Federkraft einer Gasdruckfeder |
| F _{LM} | [N] | Druckkraft eines elektrischen Linearmotors |
| v | [1] | Querkontraktionszahl |
| Р | [N/mm²] | Druck, Flächenlast |
| s, t | [m] | Materialdicke, Wandstärke |
| v | [m/s] | Geschwindigkeit |
| V | [m³, l] | Volumen |
| | | |

VI. Kurzzusammenfassung

| Hochschule: | Technische Universität Berlin |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Diplomarbeit: | CAD- und FEM-basierte Optimierung eines Mechanismus zur kontrollierten Trennung von Nutzlasten und Stufen |
| Verfasser: | Cihan Ünlü |
| MatrNr.: | 308886 |

Abstract

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt einen Entwicklungsverlauf hinsichtlich der Optimierung eines bestehenden CAD-Entwurfs zu einem Testmodell. Der Optimierungsprozess des bestehenden und in CAD entwickelten Systems eines elektromechanischen Trennmechanismus erfolgt unter Berücksichtigung der Fertigung, der Integration und der Festigkeitsüberprüfung kritisch beanspruchter Fertigungsteile. Der gesamte Entwurf muss in diesem Zusammenhang neu überarbeitet werden, dabei muss sichergestellt werden, dass die kinematischen Beziehungen mit den vorhandenen und maßgebenden Schnittstellen erhalten bleiben. Die Hauptaufgabe wird in diesem Zusammenhang das Neumodellieren des kompletten Entwurfs sein, dabei müssen Abmessungen für die Integration sämtlicher Schnittstellen erhalten bleiben, sodass die Anforderungen hinsichtlich der relevanten Abmessungen verifiziert werden können. Ein Trennmechanismus hat die Aufgabe, zwei Bauteile mit ausreichend hoher Flächenpressung zu verbinden, sodass eine Einheit gebildet wird, im gewünschten Moment jedoch muss ein solches System kollisionsfrei voneinander trennbar sein. Im bisherigen Entwicklungsverlauf wurden für den vorliegenden Entwurf Gasdruckfedern verwendet, um das fertigzustellende Testmodell anwendungsgerecht testen zu können. Für die bevorstehenden Tests eignen sich demnach Gasdruckfedern an Stelle gewöhnlicher, mechanischer Druckfedern, da sie per Knopfdruck zur Abgabe ihrer gespeicherten Federenergie ohne zusätzlicher Mechanik ausgelegt werden können. Das gesamte System muss in diesem Zusammenhang mit Hilfe einer FEM-Analyse validiert werden, d. h. es wird nicht wie sonst üblich iterativ vorgegangen. Da zu diesem Zeitpunkt vorerst ein Testmodell erstellt werden muss, wird keine Nachmodellierung durchgeführt. Die FEM-Simulation des optimierten Testmodells dient zur Deformationsanalyse diskreter Bauteile, um die laufenden Kosten bei gleichzeitiger Wahrung der Formstabilität für die weitere Entwicklung möglichst gering zu halten. Im Zuge der CAD-Neumodellierung werden hinzukommend Fertigungszeichnungen sämtlicher Fertigungsteile erstellt, um das Testmodell aufbauen und testen zu können.

1 Einleitung

In der Luft- und Raumfahrt werden fast ausschließlich vollautomatisierte Systeme verwendet, weil in der Regel die Missionen, vor allem im Raumfahrtbereich, unbemannt sind oder aufgrund von Umgebungsbedingungen nicht bedienbar sind. Die Anwendungen in diesen Bereichen werden daher ausgiebigen Tests unterzogen, um mögliche Ausfälle auf Grund technischen Versagens auszuschließen und um ein System ausreichend zu verifizieren. Bei dem vorliegenden CAD-Design handelt es sich um einen elektromechanischen Trennmechanismus mit vier pneumatisch unterstützten Gasdruckfedern, die die Arbeit zur Trennung in Form eines Energiespeichers über zwei Gasdrucktanks liefern. Die notwendige Klemmkraft wird durch zwei gegenüberliegende elektrische Linearmotoren sichergestellt.



Abb. 1.1: Bestehender CAD-Entwurf

In der obigen Abb. 1.1 ist der bestehende CAD-Entwurf des Testmodells abgebildet. Das Trennungssystem (mittig im Bild) verdeutlicht die Anbringung und Positionierung der notwendigen Elemente des Trennungssystems, wie z. B. der elektromechanische Trennmechanismus (rechts) und das pneumatische System der Gasdruckfedern (links). Im weiteren Verlauf soll das CAD-Design hinsichtlich der Integrität und Fertigbarkeit aller Fertigungsteile optimiert werden. In den oben dargestellten Baugruppen sind viele Schnittstellen beispielsweise zwischen den Bauteilen, wie Bohrungen und Grenzabmessungen, nicht fertigungsgerecht erstellt worden, sie werden im Verlauf der Designoptimierung parallel identifiziert und hinzugefügt.

1.1 Einführung in die Thematik

Für Trennmechanismen gibt es in der Luft- und Raumfahrt viele Einsatzorte. Sie werden als vollautomatisches und ferngesteuertes System eingesetzt. Ein Trennmechanismus hat die Aufgabe, zwei entsprechende Bauteile fest miteinander zu verbinden, wohingegen die Funktion darin besteht, diese im gewünschten Moment über einen Mechanismus wieder frei zu geben. Um eine Trennung herbeizuführen, werden in der Regel Energiespeicher, wie z. B. Druckfedern bzw. Gasdruckfedern, verwendet, die zwischen die zu trennenden Bauteilen gesetzt werden. Im Trennungsprozess liefern die Energiespeicher die notwendige Arbeit, um die Trennelemente räumlich voneinander zu trennen. Hierfür ist in der Regel ein zusätzlicher Aktuator notwendig, der als Auslösemechanismus für die freizusetzende Arbeit dient, um ein Ereignis in Gang zu setzten. Im aktuellen Entwurf werden Gasdruckfedern verwendet, weil die Bespannung von herkömmlichen Druckfedern für jeden Testdurchgang mit einem höheren Aufwand verbunden ist. Dahingegen kann der Druck in einer Gasdruckfeder schnell und mit wenig Aufwand wieder bedrückt werden. Im Umkehrschluss kann die Federenergie ohne zusätzlicher Demontage des Systems durch Ablassen des Drucks entspannt werden. So können in kurzen Zeitabständen eine Reihe von Tests durchgeführt werden. Die Anordnung der für die Trennung notwendigen Baugruppen, Bauteile und Systeme, sind in diesem Testmodell zylindrisch aufgebaut, weil viele Systeme in der Luft- aber vor allem in der Raumfahrt in einer zylindrischen Trägerrakete zum Einsatz kommen. Im Folgenden wird ein weiterer Trennmechanismus vorgeführt, um die Notwendigkeit solcher Systeme zu verdeutlichen. In der Firma Blue Sky Solutions GmbH, werden gegenwärtig verschiedene Modelle von Trennungssystemen entwickelt. Aufgrund eines existierenden Zeitplans zur Vollendung eines Testmodells, wird der existierende und bereits vorgestellte Entwurf aus Abb. 1.1 zur Auswahl gezogen. Im weiteren Verlauf der Produktentwicklung soll das System zusätzlich zerstörungsfreien und mechanischen Tests unterzogen werden.

1.2 Vorstellung bestehender Systeme

Im Allgemeinen werden Trennmechanismen mit einer HOLD- und RELEASE-Funktion versehen, diese können auf unterschiedlichste Weise aufgebaut werden, sodass die grobe Gestalt in vorbestimmte Trägersysteme integriert werden kann. Vorzugsweise werden sie daher quadratisch, polygonförmig oder kreisförmig aufgebaut. Generell wird der Aufbau beider Funktionen systematisch getrennt und im Aufbau schnittstellenseitig über einen Formschluss miteinander gekoppelt. Die Trennung zweier Systeme stellt eine große Herausforderung hinsichtlich der Funktionalität mit ausreichender Verifizierung dar. Die Umsetzung auf mechanischem Weg erlaubt verschiedene Möglichkeiten zur Konzeptfindung. In der Regel bedarf es einer formschlüssigen Klemmverbindung, die pyrotechnisch oder elektromechanisch mit Hilfe eines Aktuators zum Lösen gebracht wird. In den nachfolgenden Abb. 1.2 und Abb. 1.3 wird der Entwurf eines Trennungssystems von SPL Swiss Propulsion Laboratory GmbH (LLC) dargestellt.



Abb. 1.2: CAD-Modell von SPL (geschlossen) [1]

Abb. 1.3: Testmodell von SPL (offen) [2]

In Abb. 1.2 ist die Mechanik eines Trennungsmechanismus als CAD-Modell dargestellt, es besteht hauptsächlich aus einem blauen Hauptring (transparent), der Klemmmechanik und einem unteren grünen Trennrohr (transparent). Die Abb. 1.3 zeigt das entsprechende Testmodell von *SPL Swiss Propulsion Laboratory GmbH (LLC)* auf einem Prüfstand, an dem verschiedene Tests durchgeführt werden können.



Abb. 1.4: Trennmechanismus SPL (geschlossen) [2]

Abb. 1.5: Trennmechanismus SPL (offen) [2]

Die oben dargestellten Abbildungen sind Momentaufnahmen einer Bewegungssimulation des Trennungssystems von SPL. Der geschlossene Zustand des Trennungssystems auf Abb. 1.4 zeigt das Zusammenhalten der oberen und unteren Trennungseinheit über einen Hebel, der die Backe gegen die innenliegende Abschrägung drückt. Die Verklemmung wird durch eine Scherbewegung des grauen Ringausschnitts und einer entsprechenden mechanischen Verbindungstechnik mit einem weiteren Hebel hervorgerufen. Auf Abb. 1.5 ist der geöffnete Zustand der Trennungsmechanik zu erkennen. Das Verschieben des kleineren Hebels durch die Verdrehung des Ringausschnitts löst die Verklemmung auf und sorgt somit zur Entkopplung der oberen und unteren Trennungseinheit.

1.3 Einsatzorte von Trennmechanismen

Speziell in der Raumfahrt sind Trennmechanismen ein unverzichtbarer Bestandteil für das Erreichen eines Orbits. Die Separationstechnik ermöglicht z. B. dass Satelliten in Umlaufbahnen gebracht werden, die Trennung von Raketenstufen oder dass die Internationale Raumstation ISS mit neuer Versorgung verpflegt werden kann.



Abb. 1.6: Falcon 9 von SpaceX© [3]

In Abb. 1.6 ist der Trennvorgang der Trägerrakete mit der Nutzlast und dem damit verbundenen Oberstufentriebwerk zu sehen. Die Abbildung zeigt die von SpaceX[©] entwickelte Falcon 9 Trägerrakete, die sich von der Nutzlast einschließlich der Oberstufe trennt, um selbstständig auf eine vorgesehene Basisstation nahe seinem Startort zur erneuten Verwendung zurückzukehren. Die Oberstufe wird ebenfalls nach Erreichen seiner vorgesehenen Umlaufbahn von seiner Nutzlast getrennt, dabei kommt ebenfalls ein Trennmechanismus zum Einsatz. Aufgrund der wechselnden Geometrie innerhalb der Trägersysteme bedarf jedes Trennungssystem einer individuellen Anpassung, sowohl in der Funktionalität als auch in der Stabilität, da jede Separation mit unterschiedlichen Lasten abläuft. Daran kann man erkennen, wie substanziell eine trennbare Verbindung ist, die gleichzeitig den hohen Lasten während des Startvorgangs einer Rakete standhält. Die Beanspruchung der Raketenstruktur mit den verbindenden Trennelementen werden hohen Vibrationen beim Startvorgang ausgesetzt. Dabei können sich dynamisch wirkende Kräfte überlagern und zum Teil sehr starke Lasten hervorrufen, die das Material der entsprechenden lasttragenden Bauteile ermüden. Durch die reibschlüssige Verbindung zwischen den tragenden Elementen, kann es auf Grund der hohen Flächenpressung zur Kaltverschweißung der in Kontakt stehenden Materialien kommen. Um eine derart ungewollte stoffschlüssige Verbindung zu umgehen, muss eine geeignete Materialpaarung angewendet werden.

2 CAD-basierte Optimierung des bestehenden Entwurfs

Im folgendem CAD-Modell auf Abb. 2.1 ist der bestehende Entwurf des zylindrisch aufgebauten Trennungssystems dargestellt. Es umfasst einen oberes zum Trennen bestimmtes Trennrohr, an dem eine Nutzlast bzw. eine Stufe befestigt werden kann und ein unteres Trennrohr, mit dem das Pneumatik-System bestehend aus Gasdruckfeder und Gasdrucktank verbunden ist. Insgesamt sorgen im Entwurf zwei elektrische Linearmotoren für das Zusammenhalten des oberen und des unteren Trennrohrs. Die zwei Drucktanks liefern den nötigen Betriebsdruck für die vier Gasdruckfedern, welche für das Trennen beider Bauteile verantwortlich sind, sodass das obere Trennrohr auf eine minimal erforderliche Geschwindigkeit v von 2 $\frac{m}{s}$ beschleunigt wird.



Abb. 2.1: Baugruppenansicht

In der obigen Abbildung sind die einzelnen Bauteile bzw. Baugruppen lediglich lokal nummeriert. Die Weiterentwicklung jeder Baugruppe bzw. deren untergeordneten Bauteile werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert und entsprechend veranschaulicht. Die Weiterentwicklung beinhaltet in der Regel eine Optimierung von fertigungsrelevanten Verbindungselementen oder Adaptern, die unter anderem für eine Verbindung von Kaufteilen und des Trennungssystems mit den einzelnen Komponenten zum Gesamtsystem sorgen. Die nummerierten Bauteile bzw. Baugruppen sind in der folgenden Tabelle 2-1 aufgelistet.

| Stückliste des bestehenden Entwurfs | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------|----------------|
| Nr. | Bezeichnung | Stückzahl | Beschreibung |
| 1 | Oberes Trennrohr | 1 | Fertigungsteil |
| 2 | Elektr. Linearmotor | 2 | Kaufteil |
| 3 | Haltering | 1 | Fertigungsteil |
| 4 | Scharnier | 8 | Fertigungsteil |
| 5 | Gasdruckfeder | 4 | Kaufteil |
| 6 | Gasdrucktank | 2 | Kaufteil |
| 7 | Unteres Trennrohr | 1 | Fertigungsteil |
| 8 | Service Fenster Pneumatik | 2 | Fertigungsteil |
| 9 | Hauptring | 1 | Fertigungsteil |
| 10 | Klammerhalterung | 8 | Fertigungsteil |
| 11 | Klammer | 8 | Fertigungsteil |
| 12 | Backe | 8 | Fertigungsteil |
| 13 | Scharnierhalterung | 8 | Fertigungsteil |
| 14 | Führungsschiene | 4 | Kaufteil |
| 15 | Tankhalterung | 2 | Fertigungsteil |
| 16 | Kolbenhalterung | 4 | Fertigungsteil |

Tabelle 2-1: Stückliste des bestehenden CAD-Entwurfs

2.1 Vorstellung des bestehenden Entwurfs

Im vorhandenen CAD-Vorentwurf fehlen bislang sämtliche Schnittstellen zwischen den einzelnen Bauteilen und Unterbaugruppen. Ebenso existieren bislang keine Verbindungselemente wie Schrauben oder Muttern. Demnach fehlt hier die Verhältnismäßigkeit einer fertigungsgerechten Gestaltung der angedeuteten Bohrungsdurchmesser mit entsprechenden Bohrungstiefen. Allgemein ist festzustellen, dass die CAD-Konstruktion sehr viele Unregelmäßigkeiten aufweist, sodass Bohrungen bzw. Bohrmuster zweier Bauteile nicht zwingend zusammenpassen. Außerdem wurden Spaltmaße nicht berücksichtigt, sodass einige Bauteile zueinander einen unnötigen Abstand besitzen bzw. miteinander kollidieren.

2.1.1 Vorstellung der Funktionsweise des Trennmechanismus

Der bestehende CAD-Entwurf der inneren Mechanik ist in Abb. 2.2 und Abb. 2.3 vergrößert dargestellt, zu sehen ist die Mechanik des Trennungssystems ohne das obere und das untere Trennrohr.



Abb. 2.2: Bestehender CAD-Entwurf (oben)

Abb. 2.3: Bestehender CAD-Entwurf (unten)

In Abb. 2.4 ist die Klemmmechanik des Trennungssystems im geschlossenem Zustand dargestellt, der graue Halterungsring (HALTR) wird durch den elektr. Linearmotor mit der Kraft F_{LM} nach unten gedrückt. Dabei fügen sich die gelbe Klammer und die blaue Backe formschlüssig ineinander und bewirken durch die achtfache Anordnung eine stabile Verbindung. Die Gasdruckfeder hingegen wirkt mit ihrer Kraft nach oben gerichtet auf den grünen Hauptring, an dem die Nutzlast bzw. Stufe befestigt wird. Die Gasdruckfedern werden, nachdem die zwei Linearmotoren die zu trennenden Systeme miteinander fest verklemmen, permanent mit der Federkraft F_{GDF} für die Bereitstellung der notwendigen Arbeit zum Trennen sorgen.



Abb. 2.4: Backen-Klammer-Halterungssystem

Der Haltering in Abb. 2.5 ist auf Grund der Mechanik lediglich vertikal zu bewegen. In der vorhandenen Position verriegelt der Klemmstrang, der aus Klammer, Klammerhalterung, Scharnier und Scharnierhalterung besteht, zusammen mit der Backe die zu trennenden Subsysteme. In diesem Zustand drückt der Linearmotor den Haltering nach unten und hält dabei einen Abstand zum Hauptring von 71,4 mm

ein. Durch die vertikale Bewegung des Halterings wird zwischen Backe und Klammer über das Scharnier eine Klemmkraft erzeugt, die wiederum das 40-fache der Druckkraft des Linearmotors übersteigt. Durch die zweifache gelenkige Lagerung des Halterungsstrangs wird die Klemmkraft verstärkt, vergleichbar mit einem Bolzenschneider, der ebenfalls über einen doppelten Hebelmechanismus verfügt und somit eine höhere Schneidekraft erzeugt.



Abb. 2.5: Geschlossen

Abb. 2.6: Geöffnet

Abb. 2.7: Getrennt

Die mittlere Abb. 2.6 zeigt den geöffneten Zustand der Klemmmechanik. Der Linearmotor fährt in die entgegengerichtete Richtung und führt den Haltering entsprechend in vertikaler Richtung 21 mm nach oben. Über das Scharnier und der damit verbundenen Klammer löst sich der Kontakt zwischen Backe und Klammer, sodass das obere und untere Trennrohr, wie in Abb. 2.7 zu erkennen ist, durch die Gasdruckfederkraft F_{GDF} vertikal auseinander beschleunigt werden.

2.1.2 Vorstellung der Subsysteme

In der folgenden Abb. 2.8 ist eine Übersicht der Baugruppen bzw. Unterbaugruppen des bereits vorkonzipierten CAD-Entwurfs schematisch dargestellt.



Abb. 2.8: Übersicht der Baugruppen des bestehenden CAD-Entwurfs

2.2 CAD-basierte Optimierung auf Komponentenebene des Entwurfs

In diesem Kapitel wird die konstruktionsseitige Optimierung des bestehenden CAD-Entwurfs auf Komponentenebene vorgestellt. Die entsprechenden Bauteile sind in den folgenden Tabellen des nächsten Unterkapitels abgebildet. Die vorkonstruierten CAD-Modelle sind jeweils links und deren optimierte Designänderungen jeweils mittig dargestellt. Die optimierten bzw. neu entworfenen Fertigungsteile der unteren Trennungseinheit sind nicht mit aufgeführt. Die dazugehörigen technischen Zeichnungen sind dem Anhang zu entnehmen. Der Optimierungsprozess wurde unter Berücksichtigung einer kinematischen Bewegungsanalyse des Trennmechanismus hinsichtlich der Fertigbarkeit mit gleichzeitiger Reduzierung der Komplexität und Minimierung von Fertigungskosten durchgeführt. Weiterhin wurden die CAD-Modelle gewichtsoptimiert unter Wahrung der Integrierbarkeit beanspruchungsrecht umkonstruiert. Grundsätzlich gibt es keine Änderung des kinematischen Entwurfs auf Systemebene. Die jeweiligen technischen Zeichnungen sind im Anhang mit der entsprechenden Nummer hinterlegt.



2.2.1 Optimierung der Backe

Tabelle 2-2: Backe

- Abschrägung der vorderen Unterkante
 - > Abtragung unnötiger Massen zur Gewichtsreduzierung
 - Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Backe und Klammer
 - Gleichzeitige Wahrung eines funktionssicheren Trennvorgangs
- Verrundung der Klemmkante zur optimalen Halterung zwischen Backe und Klammer
 - Erweiterung der Klemmkraftverteilung zwischen der zylindrischen Mantelfläche der Klemmkante und der Backe zur entsprechenden Negativform der Klammer
 - > Konstruktionsseitige Optimierung der Trennung durch Rundungen
 - Vermeidung einer ungewollten Trennblockade während des Trennvorgangs

- <u>Rundung der hinteren und bohrseitigen Rückseite über die gesamte Höhe</u>
 - > zur Fügung zum Innenradius von R_i = 156,5 mm des unteren Trennrohrs
- Vergrößerung der rückseitigen Gewindebohrungen
 - Vergrößerung der diagonal gesetzten Gewindebohrungen von 2x M2,5 und 1x M4 zu 2x -M4 und 1x - M6
 - Zur Verringerung der Scherkraft an den Schrauben und zur Erhöhung der reibschlüssigen Lastaufnahme zum unteren Trennrohr
 - > Vermeidung von Schraubenbruch aufgrund von scherender Lasteinleitung der Klemmkraft
 - Anpassung der Gewinde- und Bohrungstiefe zum Bohraufsatzdurchmesser für eine maximale Gewindetiefe von 12 mm



2.2.2 Optimierung der Klammer

Tabelle 2-3: Klammer

- Abschrägung der Rückseite
 - > Abtragung unnötiger Massen zur Gewichtsreduzierung
 - > Beanspruchungsgerechte Überarbeitung der Gestalt für einen optimalen Kraftfluss

- <u>Verrundung der Klemmkante zur optimalen Halterung zwischen Backe und Klammer</u>
 - Erweiterung der Klemmkraftverteilung zwischen der zylindrischen Mantelfläche der Klemmkante und der Backe zur entsprechenden Negativform der Backe
 - > Konstruktionsseitige Optimierung der Trennung durch Rundungen
 - > Vermeidung einer ungewollten Trennblockade während des Trennvorgangs
- Materialzuweisung
 - Erhöhung der materiellen Festigkeit durch Verwendung von Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 zur Vermeidung von Kaltverschweißung zwischen Backe und Klammer aufgrund hoher Flächenpressung
- Vergrößerung der oberen und unteren Durchgangsbohrungen
 - Vergrößern des Bohrungsdurchmessers von Ø 6 mm auf Ø 10 mm
 - Einpressung von wartungs- und schmiermittelfreien Gleitbuchsen aus Bronze mit einer vorgegebenen Passung von H7/m6

2.2.3 Optimierung der Klammerhalterung



Tabelle 2-4: Klammerhalterung

- Abschrägen der Seitenflächen
 - > Abtragung unnötiger Massen zur Gewichtsreduzierung
 - > Beanspruchungsgerechte Überarbeitung des Designs für einen optimalen Kraftfluss

- <u>Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers</u>
 - Vergrößerung von Ø 8 mm auf Ø 10 mm für das Einpressen von wartungs- und schmiermittelfreie Gleitbuchsen aus Bronze mit einer vorgegebenen Passung von H7/m6
- Hinzufügen einer Fase entlang der Außenkontur
 - > Bessere Montierbarkeit zur rückseitigen Verschraubung mit dem Hauptring

2.2.4 Optimierung der Scharnierhalterung



Tabelle 2-5: Scharnierhalterung

- Verbinden der Scharnierhalterung zu einem Bauteil
 - > Vermeidung von Ausrichtungsdifferenzen für das Durchschieben einer Welle
 - > Exaktes Aufeinanderliegen der Durchgangsbohrungen
- Hinzufügen von rückseitigen Gewindebohrungen
 - > Verbindung über vier M3 Gewindebohrungen mit dem Haltering
 - Einfügen der Scharnierhalterung in die entsprechenden rückseitigen Taschen des Halterings
- Hinzufügen einer Fase entlang der Außenkontur
 - > Zusammenfügen der Scharnierhalterung mit dem Haltering
 - Einfache Montierbarkeit

- Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers
 - Vergrößerung von Ø 4 mm auf Ø 6 mm für das Durchziehen einer Welle mit der Passung Ø 6 H7

2.2.5 Optimierung des Scharniers



Tabelle 2-6: Scharnier

- Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers
 - Vergrößerung von Ø 8 mm auf Ø 10 mm für das Einpressen von wartungs- und ölfreien Gleitbuchsen aus Bronze mit einer vorgegebenen Passung von H7/m6
- Hinzufügen einer Fase entlang der Durchgangsbohrung
 - > Zusammenfügen der Scharnierhalterung mit dem Haltering
 - Einfache Montierbarkeit
- Materialzuweisung
 - Erhöhung der materiellen Festigkeit durch Verwendung von Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 zur Vermeidung von überhöhter Dehnung an den Außenringsegmenten des Scharniers

2.2.6 Optimierung des Halterings



Tabelle 2-7: Haltering

- <u>Entfernen von fertigungsungerechten Bauteilformen</u>
 - Fertigungsgerechte Gestaltung des Halterings f
 ür die Verbindung zum Linearmotor und f
 ür die Scharnierhalterung
 - > Entfernen der rückseitigen Bauteilausprägung
 - Hinzufügen von 8 mal 4 Senkbohrungen für die Verschraubung der Scharnierhalterung und 6 mal 2 Senkbohrungen für die Befestigung der Abstandsmuffe
- <u>Vergrößerung der Bohrungsdurchmesser</u>
 - Vergrößerung der Bohrung (insg. viermal) von Ø 12 mm auf Ø 16 mm für ein reibungsloses Auseinanderführen von Haltering und Gasdruckfeder
 - Vergrößerung von Ø 23 mm auf Ø 27 mm der Bohrung (insg. zweimal) für ein reibungsloses Ein- und Ausfahren des elektrischen Linearmotors
- Verringern des Außendurchmessers
 - Reduzierung des Gesamtaußendurchmessers auf Ø 256 mm zur kollisionsfreien Integration zwischen Haltering und Schienenführung

2.2.7 Optimierung der Distanzmuffe

| Distanzmuffe (DM) [Anhang 11] | | | | | |
|-------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--|--|
| Entwurf | | Optimierung | | | |
| | | | | | |
| DM (E) Vorderseite | DM (E) Rückseite | DM (O) Vorderseite | DM (O) Rückseite | | |

Tabelle 2-8: Distanzmuffe

Optimierung des bestehenden Bauteilentwurfs:

- Neuentwurf vom fertigungsungerechten Bauteilentwurf des Halterings
 - Fertigungsgerechte Umgestaltung f
 ür die Distanz
 überwindung von 34 mm zur Schnittstelle zwischen Linearmotor und Halterungsscheibe mit Hilfe einer Distanzmuffe als neues Bauteil
 - Zur Vermeidung eines Bauteilversagens aufgrund des ungünstigen Kraftflusses sind jeweils drei Distanzmuffen pro Linearmotor berücksichtigt
 - Hinzufügen von 2 x 2 M3 Gewindebohrungen für die Verschraubung der Distanzmuffe mit Haltering und Haltescheibe

2.2.8 Optimierung der Haltescheibe



Tabelle 2-9: Haltescheibe

Optimierung des bestehenden Bauteilentwurfs:

- <u>Neuentwurf vom fertigungsungerechten Bauteilentwurf des Halterings</u>
 - Fertigungsgerechte Umgestaltung zur Kraftübertragung des Linearmotors zum Haltering mit Hilfe einer Haltescheibe
 - Zur Vermeidung eines Bauteilversagens aufgrund des ungünstigen Kraftflusses beträgt die Wandstärke 6 mm
 - Hinzufügen von 3 x 2 Plansenkbohrungen auf der Vorderseite für die Verschraubung mit der Distanzmuffe zum Haltering
 - Hinzufügen einer Senkbohrung auf der Vorderseite und eines Zentrierungsabsatzes auf der Rückseite für die Verschraubung mit dem elektrischen Linearmotor

2.2.9 Optimierung des Bronzestabs



Tabelle 2-10: Bronzestab

- Neuer Bauteilentwurf des Bronzestabs
 - Neuentwurf zur Einhaltung eines Gesamtfederweges von 120 mm zwischen Gasdruckfeder und Hauptring
 - Zur Vermeidung von Kaltverschweißung zwischen Gasdruckfeder und Hauptring aufgrund hoher Druckkräfte und Vibrationen
 - Hinzufügen einer M6 Gewindebohrung auf der Rückseite für die Verschraubung mit dem Hauptring
 - Hinzufügen einer formschlüssigen Verdrehsicherheit auf der Rückseite mit Hilfe einer quadratischen Ausprägung
 - Bildung einer kupplungsfreien Schnittstelle zur Gasdruckfeder mit einer 2 mm tiefen Aussparung an der Vorderseite

2.2.10 Optimierung des Hauptrings



Tabelle 2-11: Hauptring

- Verstärkung der Materialtiefe
 - Erhöhung der Wandstärke von 14 mm auf 15 mm aufgrund bestellbarer Vormaterialien zur Reduzierung der Fertigungskosten
 - Verstärkung des Materials als haupttragendes Bauteil der Nutzlast
- <u>Entfernen der roten Ausprägung auf der Rückseite des Hauptrings</u>
 - Reduzierung der Kosten f
 ür die Erstellung zweier Elektronikboxen als separate Bauteile f
 ür den Linearmotor
 - > Aufteilung der Funktionen in zwei Bauteile
- <u>Fertigungsgerechte Umgestaltung</u>
 - Hinzufügen sämtlicher Plansenkbohrungen nach vorgegebenem Muster für die Anbringung der Klammerhalterung, des Bronzestabs und des Linearmotors
 - > Fertigungsgerechte Anpassung der Innenradien zum verwendeten Fräskopf
 - > Durchgangsbohrung für den Zugang zur Stellschraube des Linearmotors
 - Symmetrische Positionsverteilung der radialen M6 Gewindebohrungen (insg. 32-mal) für die Verschraubung zum oberen Trennrohr mit Kollisionsüberprüfung zu den axialen Plansenkbohrungen
 - > 1 x 1 mm Fase an der Oberkante
- Fertigungsgerechtes Hinzufügen von Aussparungen
 - Fertigungsgerechte Anpassung der Taschen (insg. achtmal) entsprechend dem Fräskopfdurchmesser für eine formschlüssige Anbringung der Klammerhalterungen
 - Fertigungsgerechte Anpassung der Taschen (insg. viermal) entsprechend dem Fräskopfdurchmesser für eine formschlüssige Anbringung der Bronzestäbe

2.2.11 Optimierung des oberen Trennrohrs

| Oberes Trennrohr (OT) [Anhang 23] | | | | |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|------------------|--|
| Entwurf | | Optimierung | | |
| | | | | |
| OT (E) Vorderseite | OT (E) Rückseite | OT (O) Vorderseite | OT (O) Rückseite | |

Tabelle 2-12: Oberes Trennrohr

- Verlängerung des Trennrohrs
 - Das obere Trennrohr wurde ursprünglich von 102,5 mm auf eine Rohrlänge von 172 mm verlängert, um diverse Schnittstellen positionieren zu können
- Aussparung für das Fenster
 - Zusätzlich sind entlang der Außenkonturen der Aussparung 4 x M3 Gewindebohrungen gesetzt worden
 - Das Fenster ist mit einem Service-Fenster [Anhang 21] für die Elektronik über 4 x M3 Innensechskantschrauben verschließbar
 - Die Aussparung dient als Schnittstelle für die Elektronik, sodass Verbindungskabel hindurchgeführt werden können
- <u>Umgestaltung der Wandstärke entlang der Höhe</u>
 - Die Wandstärke entlang der Höhe im Querschnitt des Bauteils wurde geringfügig verändert
 - Für den späteren Einsatz in der Testphase wurden die Bohrlöcher zur Anbringung von Testadaptern von 24 auf 36 x Ø 4,5 mm erweitert (36 = 2 x 18 Bohrlöcher im Abstand von 50 mm und um 10° Grad versetzt)
 - Durchgangssenkbohrungen für die Verschraubung von ursprünglich 24 auf 36 x M6 Senkschrauben erhöht
 - > Einhaltung fertigungsbedingter Wandstärken für die Verarbeitung des Vormaterials
 - Gleichzeitige Einhaltung von Mindestwandstärken für das Senken von Schrauben an der Außenseite
- Abrundung der Unterkante
 - Abrundung der Unterkante für die Erzeugung einer Linienlast entlang der Kontaktfläche zum unteren Trennrohr (siehe Abb. 2.22)

2.2.12 Optimierung des unteren Trennrohrs



Tabelle 2-13: Unteres Trennrohr

- Anpassung sämtlicher Schnittstellen
 - Überarbeitung aller Bohrungen des Vorentwurfs
 - Zur Stabilisierung der einzelnen Subsysteme wie den Führungsschienen, dem pneumatischen Anschluss, dem Gasdrucktank und der Gasdruckfeder wurden die Verbindungen vergrößert und neu angeordnet
 - Der Zugang zum pneumatischen Anschluss wurde in Design und Funktionalität verbessert
 - Asymmetrisch gesetzte Bohrungen im Vorentwurf wurden auf Symmetrie gebracht und radial ausgerichtet
- Abschrägung der oberen Kante und Stufenausschnitt
 - Zur Erzeugung einer kontaktarmen Verbindung und demnach eines reibungsarmen Trennvorgangs zwischen dem oberen Trennrohr und dem unteren Trennrohr wurde die obere Kante mit einer Fase von 1 x 10 mm angeschrägt
 - Im zweiten Schritt wurde die erzeugte neue Außenkante zusätzlich an der Oberseite für eine klemmfreie Fügung zum oberen Trennrohr mit einer 1,5 x 1,5 Fase versehen
 - > Abstufung der oberen Kante zur Erzeugung einer Kontaktfläche zum oberen Trennrohr

2.3 CAD-basierte Optimierung bestehender Entwürfe auf Systemebene

Im Folgendem werden weitere relevante Ergänzungen bzw. Weiterentwicklungen des bestehenden Entwurfs auf Subsystemebene vorgestellt. Die Weiterentwicklung betrifft hauptsächlich Verbindungsoder Befestigungselemente von Kaufteilen. Die entsprechenden Bauteile wurden hinsichtlich der Integration, der mechanischen Festigkeit und der Fertigung mit den damit verbundenen Fertigungskosten beanspruchungsgerecht umgestaltet bzw. neu entworfen. Es werden ebenfalls sämtliche Beweggründe für die gemachten Änderungen näher erläutert. Die nachstehende Abb. 2.9 zeigt eine Übersicht der Subsysteme des optimierten Trennungssystems im CAD-Modell.



Abb. 2.9: Übersicht der Subsysteme des optimierten Trennungssystems

2.3.1 Optimierung der Führungsschiene

Die Führungsschiene hat die Aufgabe, das obere Trennrohr mit dem damit verbundenen Hauptring und der Trennungsmechanik während des Trennvorgangs entlang der vertikalen Achse 120 mm zu führen. Damit soll ein Wegknicken der oberen Trennungseinheit vermieden werden und ein sicherer Trennvorgang ermöglicht werden.



Abb. 2.10: Lineargleitlager W-Profil

Abb. 2.11: Linearrollenlager

Die Führungsschiene des bestehenden Entwurfs ist in Abb. 2.10 zu sehen. Es handelt sich dabei um ein geführtes Lineargleitlager ohne Schmierung, bestehend aus einem Schlitten (grau und transparent) und einer W-förmigen Schienenführung (hellbraun). Allerdings gibt es diese Ausführung nicht mit den gewünschten Abmessungen, sodass der transparente Schlitten in seiner Breite nicht an der Innenseite des oberen Trennrohrs montierbar ist. Daher musste an dieser Stelle eine Ersatzlösung entworfen werden, die nicht ohne ein weiteres Fertigungsteil auskommt.

In Abb. 2.11 ist der Entwurf eines neuen Schienenführungssystems mit einem zusätzlichen Adapter (gelb) zur radialen Abstandseinhaltung zum unteren Trennrohr abgebildet. Das Linearrollenlager ist aufgrund seiner robusten Form und seinem geringen Rollreibungswiderstand hervorragend geeignet. Das Linearrollenlager besteht aus einer transparenten Schiene (grau) aus gehärtetem Stahl. Der Laufwagen mit fünf Rollen aus Edelstahl (grau) formschlüssig mit geringer Reibung in der Schiene geführt wird. Der gelbe Adapter ist rückseitig über drei M5 und seitlich über vier M3 Innensechskantschrauben (DIN 912) mit der Schiene verbunden.



Abb. 2.12: Schnittansicht Lineargleitlager

Abb. 2.14: Linearführungsadapter (Rückseite)

Der Linearführungsadapter [Anhang 14] wiederum besitzt zur Befestigung zum oberen Trennrohr sechs Langlochbohrungen zur exakten Positionierung, damit die Klammern vollständig die Backen am unteren Trennrohr umgreifen. Insgesamt soll das Führungssystem viermal im 90° Gradwinkel zueinander entlang der Innenseite des oberen und des unteren Trennrohrs für die Trennung in vertikale Richtung führen. Gleichzeitig übernimmt das Führungssystem eine Verdrehsicherung zwischen dem oberen Trennrohr und dem unteren Trennrohr.

2.3.3 Optimierung der Gasdruckfeder

Wie bereits erwähnt, liefern die Gasdruckfedern den nötigen Impuls für das sichere Trennen des oberen Trennrohrs zum unteren Trennrohr. Der Abwurf der damit verbundenen Nutzlast bzw. Stufe erfolgt dabei mit einer minimal geforderten Endgeschwindigkeit von 2 $\frac{m}{s}$.



Abb. 2.15: Gaskolbenfeder mit Freiheitsgrad

Abb. 2.16: Gaskolbenfeder ohne Freiheitsgrad

In Abb. 2.15 ist der vorläufige Entwurf zur Befestigung am unteren Trennrohr zu erkennen. Die Kolbenstange wird am unteren Ende mit Hilfe eines bockförmigen Befestigungselements über zwei M4 Schrauben mit dem unteren Trennrohr befestigt. Entsprechend ist die Kolbenstange über einen oberen Winkel zur vertikalen Positionierung mit zwei weiteren M4 Schrauben am Trennrohr verschraubt. Allerdings gibt es an dieser Schnittstelle einen weiteren Freiheitsgrad in vertikaler Richtung, weil die Kolbenstange lediglich über eine kreisförmige Öffnung am oberen Winkel geführt gelagert ist. Am unteren Ende der Kolbenstange ist ein L-Stück für die pneumatische Druckzuführung verschraubt. Dahingegen ist am oberen Ende aus Sicherheitsgründen für die Testphase ein Schalldruckdämpfer eingeschraubt. Sowohl das L-Stück als auch der Schalldruckdämpfer bleiben im weiteren Verlauf unverändert.

Die Abb. 2.16 zeigt die optimierte Gasdruckfeder mit eliminiertem Freiheitsgrad. Die obere Gasdruckfederhalterung [Anhang 16] wird mit einer M22 Sechskantmutter am oberen Ende der Kolbenstange verschraubt. Die seitlich liegende Langlochbohrung sorgt für eine integrationsgerechte Befestigung über zwei M6 Schrauben zum unteren Trennrohr. Die bockförmige untere Gasdruckfederhalterung [Anhang 17] wurde beanspruchungsgerecht vergrößert. Die schnittstellenseitige Verbindung zum Trennrohr wurde verlängert und mit insgesamt drei M6 Durchgangsbohrungen erweitert. Des Weiteren wurde ein beidseitiger Gewindebolzen zur Befestigung der Kolbenstange am unteren Befestigungselement ergänzt, welcher wiederum beidseitig mit zwei Sechskantmuttern angezogen wird.
2.3.4 Optimierung des Gasdrucktanks

Am unteren Trennrohr werden wie bereits erwähnt zwei Gasdrucktanks angebracht, welche den notwendigen Druck für die Erzeugung der Gasfederkraft F_{GDF} liefern. Die Gasdrucktanks werden über einen biegsamen Pneumatikschlauch mit den Gasdruckfedern verbunden.



Abb. 2.17: Gasdrucktank mit Klammern

Abb. 2.18: Gasdrucktank mit Winkel

Die Abb. 2.17 zeigt den Gasdrucktank zum Bedrücken der Gasdruckfedern mit einer Klammer, welche über zwei Angriffspunkte reibschlüssig als Befestigungselement dient. Im vorhandenen CAD-Modell ist eine ungünstige Konfiguration von Kupplungsdose und L-Stück gewählt worden, um den Druck im Tank zu speichern. Am oberen Ende verzweigt sich der Druck über ein T-Stück mit Verlängerung zu jeweils zwei Gasdruckfedern.

In Abb. 2.18 ist die obere [Anhang 18] und untere [Anhang 19] Gasdrucktankhalterung mit sechskantiger Öffnung zum Einspannen des Tanks zu sehen. Der obere Winkel wird über eine Langlochbohrung und mit zwei M6 Schrauben an das untere Trennrohr angepasst verschraubt, sodass keine zusätzliche Vorverspannung auf die Winkel belastend wirkt. An das untere Ende wurde aufgrund der Redundanz ein L-Stück mit integriertem Rückschlagventil angeschlossen. Das obere Ende wurde auf ein T-Stück ohne Verlängerung umkonstruiert, um dabei Bauraum einzusparen. Insgesamt wurde das System kompakter umgestaltet und hinsichtlich seiner Funktionalität optimiert.

2.3.6 Optimierung des pneumatischen Anschlusses

Für das Wiederauffüllen der beiden Gasdrucktanks sind zwei Anschlüsse in Form eines abnehmbaren Fensters vorgesehen, um den Zugang für die Druckbeaufschlagung auch während eines Einsatzes des Trennungssystems zu ermöglichen.



Abb. 2.19: Schnittstelle für Pneumatik

Abb. 2.20: Pneumatischer Anschluss

Die obige Abb. 2.19 zeigt ein abnehmbares Fenster, das über zwei Profile an der Innenwand des unteren Trennrohrs verschraubt ist. Im Hintergrund ist der Vorentwurf des Anschlusses für die Druckbeaufschlagung des Gasdrucktanks zu sehen. Aufgrund der anfänglichen Fehlkonstruktion wurde der pneumatische Anschluss vollständig überarbeitet, weil die Dimensionierung des Fensters durch den Neuentwurf vergrößert werden musste. Zusätzlich fehlen sämtliche Verbindungselemente, wie Schrauben oder Muttern, die sowohl die Profile an der Rohrinnenwand verbinden, als auch das Fenster über die Profile festhalten. Außerdem stimmen die Bohrungsmuster der entsprechenden Bauteile zueinander nicht überein und einige Bohrungen sind nicht senkrecht zur Rohrwand bzw. radial zur zylindrischen Mittelachse gesetzt worden, sodass eine Verschraubung im vorhandenen Entwurf nicht möglich ist.

In Abb. 2.20 ist der Neuentwurf zu sehen. Das untere Service-Fenster [Anhang 22] für den pneumatischen Anschluss wurde zu einem schraubschlüssigen Deckel umgestaltet, der mit acht M4 Schrauben an dem unteren Trennrohr mit entsprechender Aussparung befestigt ist. Außerdem ist für eine externe Befüllung der Gasdrucktanks ein zusätzlicher Kupplungsstecker für den Anschluss eines Kompressors zum Befüllen erforderlich. Für die Anbringung der Kupplungsdose ist es notwendig ein weiteres Bauteil zu entwerfen, in dem die Kupplungsdose und rückseitig ein pneumatischer Stecker mit Verlängerung zum Rückschlagventil verschraubt sind. Die Kupplungshalterung (braun) wird über drei M6 Schrauben an der Rohrinnenwand befestigt und sorgt für eine stabile Handhabung der Kupplungsdose, da beim Einstecken bzw. Entkoppeln eines Kompressors Kraft aufgebracht wird, die über die Rohrwand aufgenommen wird. Die Kupplungshalterung [Anhang 20] hat aufgrund der Durchflussfunktion des beaufschlagten Drucks am Anschraubende eine beachtliche Wandstärke von 16 mm, sodass die Gewindebohrung sowohl die Kupplungsdose auf der einen Seite als auch den pneumatischen Stecker auf der Rückseite ohne Druckverlust verbindet.

2.3.7 Optimierung der Trennverbindung

Die Kontaktflächen der Hauptschnittstelle zwischen dem oberen und dem unteren Trennrohr wurden reibungsarm und trennungskonform umgestaltet. Um eine sichere Separation zu ermöglichen, ist es empfehlenswert, die Kontaktflächen durch geometrische Umformung der jeweiligen Bauteilenden auf eine Linienlast zu reduzieren.



Abb. 2.21: Kontaktfläche



In Abb. 2.21 besteht der Kontakt aus einer Fläche. Die entsprechenden Enden der Bauteile sind lediglich im 45°- Winkel angeschrägt, sodass hier Flächen aufeinander stehen, die eine Separation im Ernstfall durch eine ungewollte Verklemmung verhindern könnten. Außerdem kann bei diesem Entwurf ein Ineinandergleiten nicht ausgeschlossen werden, wodurch ebenfalls eine Separation verhindert werden könnte.

Die in Abb. 2.22 dargestellte Schnittansicht des optimierten Entwurfs verdeutlicht die halbkreisförmige Unterkante des oberen Trennrohrs. Daraus ergibt sich ein linienförmiger Kontakt zwischen den Bauteilen in Form eines Kreises. Am unteren Trennrohr ist demnach eine plane Stufe als Kontaktstelle zum oberen Trennrohr vorgesehen. Die seitlichen Führungsränder stehen bei beiden Bauteilen in einem unterschiedlichen Winkel zueinander, sodass an der Stelle kein Kontakt bestehen kann.

2.3.8 Optimierung des Trennmechanismus

Wie bereits beschrieben, wurden sämtliche Bauteile des Trennungsmechanismus umkonstruiert bzw. neu entworfen. Abschließend sind sowohl der Vorentwurf als auch der optimierte Entwurf zum Vergleich dargestellt.



Abb. 2.23: Vorentwurf isometrisch

Abb. 2.24: Neuentwurf isometrisch

An dieser Stelle empfiehlt es sich die entsprechende Baugruppenzeichnung mit Stückliste [Anhang 4] im Anhang einzusehen. Der Trennungsmechanismus [Anhang 1 bis 3] wurde ohne Änderung der maßgebenden Schnittstellen zu den Subsystemen bezüglich der Außenabmessungen erfolgreich optimiert.

2.4 Zusammenfassung des CAD-basierten Optimierungsprozesses

Insgesamt war die Überarbeitung des bestehenden CAD-Modells sehr umfangreich, denn nahezu alle Bauteile, Systeme und Subsysteme mussten fertigungsgerecht optimiert werden. Zudem bestand die Notwendigkeit, weitere Bauteile für fehlende Schnittstellen zu entwerfen. Der Optimierungsprozess wurde zusätzlich durch unvorteilhafte Bauteilentwürfe im CAD-Modell erschwert. Sämtliche Bauteile waren asymmetrisch angesetzt und mussten aufwendig umgestaltet werden. Außerdem wurden alle Schnittstellen zwischen den einzelnen Systemen und Subsystemen komplett erneuert, da die ursprünglich konstruierten Verbindungen nicht fertigungsgerecht waren bzw. falsch angesetzt waren sowohl in ihrer Position als auch im Winkel zur Oberfläche des entsprechenden Bauteils.

Abschließend wurde das komplette Design fertigungsgerecht, integrierbar, beanspruchungsgerecht und gewichtsoptimiert verfeinert. Die kinematischen Bewegungen für das Verklemmen des Trennmechanismus wurden ebenfalls überarbeitet und hinsichtlich ihrer Funktionalität überprüft. Die wesentlichen Punkte im Optimierungsprozess wurden hiermit eingehalten und erledigt.

3 FEM-basierte Validierung des überarbeiteten Entwurfs

In diesem Kapitel wird der optimierte Entwurf einer Deformationsanalyse unterzogen sowohl zur Funktionalität als auch zur Reduzierung der Masse für die weitere Entwicklung. Aufgrund der umfangreichen Optimierung des CAD-Vorentwurfs wird im weiteren Verlauf die FEM-Analyse auf einzelne wesentliche Bauteile des Trennmechanismus diskretisiert. Das Ziel dieser FEM-Simulation ist die Untersuchung der Verformungszustände einzelner Bauteile des Trennungssystems. Das System wird hinsichtlich seiner Funktionalität auf tolerierbare Verformungen untersucht, wobei die Analyse der Spannungszustände durch eine mechanische Beanspruchung hier entfällt. Ein Materialversagen wird unter den gegebenen Bedingungen mit relativ stark überdimensionierten Bauteilen nicht erwartet. Der Trennmechanismus funktioniert über die bereits beschriebene Klemmmechanik zwischen Klammer und Backe. Das System wurde unter Berücksichtigung einer ausreichend hohen Kontaktfläche zwischen den tragenden Elementen konzipiert. Dies setzt wiederum eine hohe Klemmkraft mit entsprechender Flächenpressung bei möglichst minimalem Spaltmaß zwischen den tragenden Bauteilen voraus.

3.1 Identifizierung und Auswahl kritisch belasteter Bauteile

Im aktuellen CAD-Design des optimierten Entwurfs bilden der Haupt- und der Haltering im Wesentlichen die haupttragenden Elemente des Trennungssystems. Eine Verformung beider Bauteile im Betriebszustand kann unter Umständen die Klemmverbindung zwischen Backe und Klammer unterbinden, sodass kein einheitlicher Kontakt gegeben ist. Es wird davon ausgegangen, dass der gesamte Strang der Klemmmechanik aufgrund der starken Überdimensionierung für die Bereitstellung einer genügend großen Kontaktfläche unverformt bleibt. Für die Sicherstellung einer vollständigen Umschließung der Kontaktflächen zwischen den acht Backen und Klammern während der Testphase wird im weiteren Verlauf aufgrund der fehlenden Sichtkontrolle eine Validierung durch die FEM herangezogen. Hierfür wird die Verformungsanalyse mit Hilfe der FEM-Software ABAQUS von Dassault Systèmes[®] durchgeführt.

3.2 FEM-basierte Analyse ausgewählter Bauteile

Die Auswahl kritisch belasteter Bauteile erfolgt hinsichtlich der zu erwartenden Verformung, sodass eine Funktion des Trennungsmechanismus gegeben ist. Daher beschränkt sich die Analyse auf den Haupt- und den Haltering, weil diese Elemente sowohl unter einem ungünstigen Kraftfluss stehen als auch wesentlich zur Funktion des Systems beitragen. Die folgende Abb. 3.1 zeigt die angreifenden Flächenlasten, verursacht durch die vier Gasdruckfedern und zwei Linearmotoren, in Schnittdarstellung zum Haupt- bzw. Haltering. Die Gasdruckfedern im CAD-Modell der unteren Abbildung sind nicht abgebildet. Deren Krafteinleitung ist über die Bronzezylinder zu erkennen, die bekanntlich als Zwischenelement für die kaltverschweißungsfreie Materialpaarung dienen.



Abb. 3.1: Auswahl der Bauteile zur FEM-Analyse

Die in Abb. 3.1 angedeuteten FEM-Schaubilder des Haupt- und Halterings zeigen eine verstärkte Verformungsdarstellung unter entsprechender Belastung. Die Netzdichte für die Berechnung wurde über das FEM-Programm automatisch durch das Festlegen einer globalen Approximationskonstante (GSI -Global Size Index), wie in Abb. 3.2 zu sehen ist, bestimmt. Die dafür durchgeführten Verformungssimulationen wurden mit einer Netzdichte von GSI = 3 automatisch generiert und die anschließend berechneten Ergebnisse in Tabelle 3-4 aufgeführt.

| 🔶 Global Seeds 🗙 |
|-------------------------------------------------|
| Sizing Controls |
| Approximate global size: 3 |
| Curvature control |
| Maximum deviation factor (0.0 < h/L < 1.0): 0.1 |
| (Approximate number of elements per circle: 8) |
| Minimum size control |
| By fraction of global size (0.0 < min < 1.0) |
| C By absolute value (0.0 < min < global size) |
| OK Apply Defaults Cancel |

Abb. 3.2: Eingabe der Approximationskonstante GSI

Die Netzstruktur wurde sowohl für das ganze Bauteil als auch adaptiv für lokal wirkende Belastungen unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften verfeinert, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu steigern und um durch vergleichbare Werte der Deformationsanalyse die Ergebnisse zu verifizieren.

3.2.1 Zuweisung der Materialeigenschaften des Haupt- und Halterings

Zur Einsparung des Gewichts wurden ursprünglich der Haupt- und der Haltering aus Aluminium konzipiert. Der überdimensionierte Hauptring aus Aluminium verbleibt hinsichtlich der Legierungsauswahl unverändert. Im Gegenzug dazu wurde aufgrund der geringen Wandstärke das Material des Halterings bei gleichbleibendem technischen Design durch Edelstahl ersetzt.

Hauptring:

Der Hauptring, bestehend aus Aluminium mit der Werkstoffnummer 3.4365 nach DIN 1725, wurde auf eine Wandstärke von 15 mm verstärkt, um einer Verformung während der Testphase entgegenzuwirken und um eine ausreichend hohe Umschließung der kraftübertragenden Kontaktflächen zwischen den einzelnen Backen und Klammern sicherzustellen. Die Eingabewerte für die Materialkonstanten von Aluminium betragen für die Querkontraktionszahl v mit 0.33 und für das E-Modul E mit 72.000 N/mm². [4]

Haltering:

Der Haltering wiederum verbleibt hinsichtlich seiner Wandstärke von 6 mm unverändert. Auf Grund der eingesenkten M3 Schraubverbindung und der Einpassungsaussparung für die Scharnierhalterung ist die Wandstärke hinsichtlich der Vermeidung einer Überbeanspruchung des Materials nicht weiter zu reduzieren. Um jedoch der Beanspruchung verformungsfrei entgegenzuwirken, wird die ursprünglich gewählte Aluminiumlegierung durch Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301 nach DIN EN 10088-3 ersetzt. Dabei wurden für die entsprechenden Materialkonstanten von Edelstahl eine Querkontraktionszahl v von 0.3 und ein E-Modul E von 200.000 N/mm² zugrunde gelegt. [5]

3.2.2 Erstellung der Netzstruktur des Haupt- und Halterings

Die Erstellung der Netzstruktur wird, wie bereits beschrieben, über das FEM-Programm automatisch durch das Festlegen der globalen Approximationskonstante GSI erstellt. Dabei wird das Netz iterativ weiter verfeinert, bis die Genauigkeit der Ergebnisse nicht mehr wesentlich voneinander abweicht. Es werden adaptiv zwei weitere Untersuchungen beider Bauteile zur Deformationsanalyse unter Erstellung höherer Netzdichten durchgeführt. Dabei werden die jeweiligen Symmetrieeigenschaften genutzt, um die Netzstruktur durch das Festlegen der globalen Approximationskonstante GSI weiter zu verfeinern. In der nachstehenden Tabelle 3-1 sind die verschiedenen Voreinstellungen zur Berechnung der Netzstruktur aufgelistet.

| Übersicht zur Einstellung der Netzstruktur des Hauptrings | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|---------------|-----------------|--------------|--|--|
| Bauteil - Einstellung | Elementanzahl | Netzdarstellung | Durchbiegung | | |
| HAUPTRING - 15 mm - GSI: 2 | 609134 | 5 | 3,142 μm | | |
| HAUPTRING - 15 mm - GSI: 3 | 297134 | | 3,123 μm | | |
| HAUPTRING - 15 mm - GSI: 4 | 213198 | | 3,118 μm | | |
| HAUPTRING - Ausschnitt - 15 mm - GSI: 1 | 1594511 | ~ | 3,168 μm | | |

Tabelle 3-1: Übersicht zur Erstellung der Netzstruktur des Hauptrings

Aufgrund der Wandstärke des Halterings von 6 mm konnte die Netzstruktur feiner erstellt werden. Im Vergleich zum Hauptring besitzt der Haltering ein wesentlich kleineres Volumen. Dadurch war eine Berechnung mit feiner Elementierung bei relativ geringer Rechenzeit durchführbar. Die folgende Tabelle 3-2 zeigt die Übersicht der verschiedenen Netzstrukturen des Halterings.

| Übersicht zur Einstellung der Netzstruktur des Halterings | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|---------------|-----------------|--------------|--|--|--|
| Bauteil - Einstellung | Elementanzahl | Netzdarstellung | Durchbiegung | | | |
| HALTERING - 6 mm - GSI: 1 | 791096 | | 6,747 μm | | | |
| HALTERING - 6 mm - GSI: 2 | 137965 | | 6,092 μm | | | |
| HALTERING - 6 mm - GSI: 3 | 57639 | | 5,930 μm | | | |
| HALTERING - Ausschnitt - 6 mm - GSI: 0.5 | 855614 | | 6,273 μm | | | |

Tabelle 3-2: Übersicht zur Einstellung der Netzstruktur des Halterings

Die Berechnungen der jeweils letzten Tabelleneinträge der Bauteilausschnitte sorgen durch eine feinere Elementierung für ein genaueres Ergebnis. Dabei wurden die Berechnungsgrenzen des Hauptund des Halterings auf die Symmetrien bzw. auf lokale Beanspruchungsgrenzen beschränkt. Somit konnte eine kürzere Rechenzeit erzielt werden und im Umkehrschluss konnte bei gleich langer Rechenzeit ein genaueres Ergebnis errechnet werden. Die aufgelisteten Ergebnisse der FEM-Berechnung dienen anschließend als Vergleichswerte für die Bestimmung eines Grenzwertes für eine effizient eingestellte Elementierung. In Kapitel 3.2.7 werden die Ergebnisse zusammengefasst und kritisch diskutiert.

3.2.3 Zuweisung von Lasten

Wie schon erwähnt werden die Lasten am Hauptring durch die vier Gasdruckfedern und die zwei Linearmotoren verursacht. Der Haltering wird lediglich durch die zwei elektrischen Linearmotoren beansprucht. In den folgenden Abbildungen werden die einzelnen statisch wirkenden Flächenlasten am FEM-Modell dargestellt.

Hauptring:

Die folgende Abb. 3.3 veranschaulicht das FEM-Modell des Hauptrings für die Zuweisung der maximalen Krafterzeugung des elektrischen Linearmotors von 100 N. Im Modell kennzeichnen die zwei rot dargestellten Flächenlasten auf der Rückseite des Hauptrings die Lasteinleitungen von insgesamt 200 N der zwei Linearmotoren. Die radial angesetzten Punkte an den 32 M6 Gewindebohrungen, die entlang der Außenkante des Hauptrings zu sehen sind, stellen die feste Einspannung an den Innenflächen der Bohrungen dar.

| 🕂 Edit Load 🔀 | A CONTRACTOR OF |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Name: Load-2 | |
| Type: Pressure | |
| Step: Step-1 (Static, General) | |
| Region: Surf-2 💫 | |
| Distribution: Total Force f(x) | |
| Magnitude: 200 | |
| Amplitude: (Ramp) | |
| OK Cancel | |
| | |
| | |

Abb. 3.3: Flächenlast der 2 elektr. Linearmotoren am Hauptring

In der nachfolgenden Abb. 3.4 ist die Rückseite des Hauptrings im FEM-Modell zu sehen. Die Flächenlast wurde über die vierfache Gasdruckfederkraft von jeweils 250 N mit insgesamt 1000 N angegeben. Auf der Rückseite des Hauptrings kennzeichnen die vier symmetrisch und axial verteilten Lasteinleitungen die Flächenlast.



Abb. 3.4: Flächenlast der 4 Gasdruckfedern

Haltering:

Das FEM-Modell des Halterings für die Darstellung der Krafteinleitung ist in der folgenden Abb. 3.5 zu sehen. Insgesamt wirken die zwei elektrischen Linearmotoren mit 200 N auf die zwölf rot dargestellten Flächen an den Schraubverbindungen. Der Haltering wird auf der Rückseite über die acht Einpassungsaussparungen für die Scharnierhalterung fest eingespannt.



Abb. 3.5: Flächenlast der 2 elektr. Linearmotoren am Haltering

3.2.4 FEM-Analyse des Hauptrings

Wie bereits erwähnt, ist der Hauptring das haupttragende Element im optimierten Entwurf. Unter den gegebenen statischen Belastungen der vier Gasdruckfedern und der zwei Linearmotoren aus Kapitel 2.1 wurde die folgende lineare FEM-Berechnung durchgeführt. In der folgenden Abb. 3.6 ist die FEM-Simulation der Durchbiegung des Hauptrings mit einer Stärke von 15 mm dargestellt. Die Approximationskonstante wurde mit einem GSI von 2 für die automatische Netzerstellung vorgegeben.



Abb. 3.6: Verformungssimulation des Hauptrings

Das FEM-Schaubild zeigt erwartungsgemäß eine hohe Durchbiegung entlang der innen liegenden Flansche, an denen die zweifache Krafteinleitung der elektrischen Linearmotoren und die vierfache Druckkraft der Gasdruckfedern angreifen. An den entsprechenden Bohrungen werden die Druckkräfte der elektrischen Linearmotoren insgesamt zweimal und die der Gasdruckfedern insgesamt viermal über die Bronzestäbe eingeleitet. Der Hauptring wird über die 32 radialen M6 Gewindebohrungen fest eingespannt.

Die Deformationsanalyse weist eine maximale Durchbiegung von 3,142 µm auf. Sie tritt vor allem an der Innenkante der vier Innenflansche für die Befestigung der Bronzestäbe auf. Die Verformung fällt entsprechend der größeren Kraft, verursacht durch die Gasdruckfeder, stärker aus.

Da aufgrund der Fertigung an dieser Stelle ein Toleranzwert von 0,1 mm vorgegeben wurde, liegt die maximal auftretende Durchbiegung des Hauptrings deutlich unterhalb des Toleranzwertes. Eine Gefahr für die Beeinträchtigung der Klemmmechanik wird daher ausgeschlossen.

3.2.5 FEM-Analyse des Halterings

Der Haltering ist ebenfalls hinsichtlich der Sicherstellung einer vollständigen Umschließung der Kontaktflächen zu untersuchen. Der Haltering besitzt eine Wandstärke von 6 mm und besteht aus Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4301. In der nachfolgenden Abb. 3.7 ist die FEM-Simulation der Durchbiegung des Halterings zu sehen.



Abb. 3.7: Verformungssimulation des Halterings

Am Haltering wirken die Kräfte der beiden elektrischen Linearmotoren. Sie werden über die Distanzmuffen und die Haltescheibe mit sechs M3 Innensechskantschrauben an den zwei Außenflanschen eingeleitet. Demnach sind die höchsten Durchbiegungen auf dem obigen FEM-Schaubild erwartungsgemäß an den Außenkanten der jeweiligen Flansche zu sehen. Der Haltering ist auf der Rückseite an den acht Innenflächen für die feste Einspannung der Scharnierhalterung gelagert.

Die maximale Durchbiegung beträgt in diesem Fall 6,747 µm und ist in der obigen Simulation an den rot gefärbten Außenkanten zu erkennen. Wie bereits erwähnt, liegt der Toleranzbereich bei 0,1 mm, weil aufgrund kleiner Fertigungsungenauigkeiten eine Abweichung in der Geometrie des Gesamtsystems erwartet wird.

Aufgrund des vorgegebenen Toleranzwertes liegt das Ergebnis der FEM-Simulation mit der maximal auftretenden Durchbiegung von 6,747 µm im Toleranzbereich. Daher wird eine verformungsbedingt verringerte Flächenpressung zwischen den Backen und Klammern ausgeschlossen.

3.2.6 FEM-Analyse des Hauptrings bei verschiedenen Wandstärken

Zur Gewichtsoptimierung für die weitere Entwicklung des Trennungssystems wurde eine FEM-Analyse des Hauptrings bei verschiedenen Wandstärken durchgeführt. In der untenstehenden Tabelle 3-3 sind die Ergebnisse der FEM-Simulation hinsichtlich der Durchbiegung aufgelistet. Für die Validierung der Netzstruktur hinsichtlich der Netzdichte für jede Wandstärke wurde dasselbe Verfahren, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, angewendet. Die Netzdichten jedes Hauptrings mit unterschiedlicher Wandstärke wurden durch das Zuweisen verschiedener Approximationskonstanten verfeinert und erstellt. Dabei verblieben die restlichen Berechnungsparameter im FEM-Modell unverändert hinsichtlich der Zuweisung von Material, Belastungsgrößen und Lagerungsarten.

| FEM-Simulation des Hauptrings mit versch. Wandstärken | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-----|----------|-------------------------------|--------------|--|--|
| Bauteil | GSI | Elemente | FEM-Simulation der Verformung | Durchbiegung | | |
| HAUPTRING 7 mm | 3 | 142313 | | 15,320 μm | | |
| HAUPTRING 9 mm | 3 | 179327 | | 9,885 μm | | |
| HAUPTRING 12 mm | 3 | 240203 | | 5,082 μm | | |
| HAUPTRING 15 mm | 3 | 297134 | | 3,123 μm | | |

Tabelle 3-3: FEM-Simulation des Hauptrings mit versch. Wandstärken

Die Verformungsanalysen ergaben eine entsprechende Zunahme der Durchbiegungen bei Verringerung der Wandstärke für die verschiedenen Ausführungen des Hauptrings. Nach der FEM-Berechnung des Hauptrings mit einer Wandstärke von 7 mm beträgt die maximale Durchbiegung 15,320 µm und liegt weiterhin innerhalb des Toleranzbereiches. Allerdings wird an dieser Stelle empfohlen, die Spannungszustände des belasteten Bauteils im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen mit zu berücksichtigen. Aufgrund der versenkten Schraubverbindung und der radial gesetzten M6 Gewindebohrungen kann die Wandstärke des Hauptrings an gegebener Stelle 2 mm betragen. Daher ist im weiteren Entwicklungsprozess bei der Optimierung des Gewichts eine FEM-Analyse der Spannungszustände durchzuführen, um eine Aussage über die Festigkeit treffen zu können.

3.2.7 Adaptive Netzverfeinerung des Haupt- und Halterings

Wie bereits verdeutlicht, wird im Folgenden zur Validierung der bereits errechneten Durchbiegungen des Haupt- bzw. Halterings eine optimierte FEM-Analyse mit adaptiver Netzverfeinerung des symmetrisch halbierten Hauptrings und des beanspruchungsgerecht unterteilten Halterings durchgeführt. Dabei wurden entsprechende Ausschnitte aus den jeweiligen Bauteilen erstellt, um die Qualität der Ergebnisse durch die Zuweisung höherer Netzdichten zu verbessern.

FEM-Analyse des halbierten Hauptrings mit adaptiver Netzverfeinerung

Die folgende FEM-Analyse auf Abb. 3.8 des symmetrisch halbierten Hauptrings wurde mit einer Wandstärke von 15 mm und einer Elementanzahl von 1.594.511 durchgeführt. Dabei wurden die Belastungsgrößen der hervorgerufenen Flächenlasten des Linearmotors und der Gasdruckfedern halbiert. Die Netzstruktur wurde automatisch mit einem GSI von 1 erstellt.



Abb. 3.8: FEM-Analyse des halbierten Hauptrings

In der oben dargestellten FEM-Simulation ist die Durchbiegung des halbierten Hauptrings unter den beschriebenen Bedingungen veranschaulicht. Die rot markierten Bereiche der Verformungssimulation stellen die maximale Durchbiegung der innenliegenden Flansche dar. Die Gasdruckfedern greifen direkt über die Bronzestäbe an den naheliegenden Durchgangsbohrungen an. Zusammen mit der Belastung des elektrischen Linearmotors ist erwartungsgemäß die Verschiebung an der Außenkante der Innenflansche am höchsten. Der maximal auftretende Durchbiegung von 3,142 µm in Kapitel 3.2.4. Es ist zu erkennen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse asymptotisch zu einem Grenzwert tendiert. Der Grad der Ergebnisgenauigkeit der FEM-Berechnung wird bei einem Toleranzbereich von 100 µm akzeptiert. Die Validierung der Ergebnisse der Verformungsanalyse ist hiermit abgeschlossen.

FEM-Analyse des beanspruchungsgerecht unterteilten Halterings mit adaptiver Netzverfeinerung

Wie in Kapitel 3.2.2 erwähnt, wird adaptiv die Netzstruktur des Halterings hinsichtlich der lokalen Beanspruchung verfeinert. Die nachstehende FEM-Simulation auf Abb. 3.9 stellt die Ergebnisse der Durchbiegung dar. Der Haltering besitzt eine Wandstärke von 6 mm und die Netzstruktur wurde mit einer Elementanzahl von 855.614 erstellt. Aufgrund des Teilausschnitts des Halterings konnte die Netzdichte mit einem GSI von 0.5 erstellt werden. Die eingeleitete Flächenlast des elektrischen Linearmotors wurde entsprechend halbiert.



Abb. 3.9: Haltering mit adaptiver Netzverfeinerung

Wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben, erfährt der Haltering die höchste Durchbiegung, entsprechend der roten Markierung an der Außenkante. Aufgrund der angreifenden Flächenlast an den Senkflächen der sechs konzentrisch angeordneten Durchgangsbohrungen tritt die maximale Verschiebung erwartungsgemäß an der Außenkante auf. Dazu trägt auch die feste Einspannung des Halterings über die im Muster angeordneten Senkbohrungen für die Scharnierhalterung bei, die im CAD-Modell rückseitig verschraubt ist. Das Ergebnis der FEM-Berechnung des maximal auftretenden Durchbiegungswertes bei dieser Simulation von 6,273 µm unterscheidet sich nur geringfügig um -0,201 µm zu der ermittelten Durchbiegung von 6,747 µm in Kapitel 3.2.5. Das negative Vorzeichen lässt sich durch die Erstellung des Teilausschnitts erklären. Die Genauigkeit der Ergebnisse tendiert zu einem Grenzwert der berechneten Durchbiegung. Der Grad der Ergebnisgenauigkeit wird unter Berücksichtigung des Toleranzwertes von 100 µm akzeptiert. Eine Validierung der Ergebnisse ist hiermit abgeschlossen, weil es keine nennenswerten Änderungen der Ergebnisse gibt. An dieser Stelle wird empfohlen, die FEM-Berechnung unter der Materialzuweisung von Aluminium AW 7075 durchzuführen, um die Masse des Halterings nach erfolgter Überprüfung der Ergebnisse weiter reduzieren zu können.

3.2.8 Zusammenfassung aller Ergebnisse der FEM-Simulation

Wie bereits beschrieben wurden mehrere Berechnungen hinsichtlich der verschiedenen Netzdichten und Wandstärken durchgeführt. In der folgenden Tabelle 3-4 sind die entsprechenden Ergebnisse der maximal auftretenden Durchbiegungen aufgelistet.

| Zusammenfassung aller Ergebnisse | | | | | | |
|----------------------------------|------------|-----|---------------|--------------------|--|--|
| Bauteil | Wandstärke | GSI | Elementanzahl | Durchbiegung in µm | | |
| HAUPTRING | 15 mm | 2 | 609134 | 3,142 | | |
| HAUPTRING | 15 mm | 3 | 297134 | 3,123 | | |
| HAUPTRING | 15 mm | 4 | 213198 | 3,118 | | |
| HAUPTRING - Ausschnitt | 15 mm | 1 | 1594511 | 3,168 | | |
| HAUPTRING | 12 mm | 2 | 495904 | 5,115 | | |
| HAUPTRING | 12 mm | 3 | 240203 | 5,082 | | |
| HAUPTRING | 12 mm | 10 | 99441 | 5,010 | | |
| HAUPTRING | 9 mm | 2 | 366882 | 9,967 | | |
| HAUPTRING | 9 mm | 3 | 179327 | 9,885 | | |
| HAUPTRING | 9 mm | 10 | 72368 | 9,710 | | |
| HAUPTRING | 7 mm | 2 | 292448 | 15,750 | | |
| HAUPTRING | 7 mm | 3 | 142313 | 15,320 | | |
| HAUPTRING | 7 mm | 10 | 60304 | 15,030 | | |
| HALTERING | 6 mm | 1 | 791096 | 6,747 | | |
| HALTERING | 6 mm | 2 | 137965 | 6,092 | | |
| HALTERING | 6 mm | 3 | 57639 | 5,930 | | |
| HALTERING - Ausschnitt | 6 mm | 0.5 | 855614 | 6,273 | | |

Tabelle 3-4: Zusammenfassung aller Ergebnisse

Es ist erwartungsgemäß zu erkennen, dass die Genauigkeit bei zunehmender Netzdichte bedingt durch den GSI zunimmt. Die Anzahl der Elemente und somit die Rechenzeit nimmt bei kleinerem GSI signifikant zu. Aufgrund der geringfügigen Abweichung zwischen den Durchbiegungswerten bei einem vorgegebenen GSI von 2 bzw. 3 wird davon ausgegangen, dass eine feinere Einstellung der Netzstruktur bei einem Toleranzwert der erlaubten Fertigungstoleranzen von 100 μm nicht notwendig ist.

3.3 Zusammenfassung des FEM-basierten Validierungsprozesses

Die Erstellung der FEM-Simulationen war trotz des Einarbeitungsaufwands in das FEM-Programm erfolgreich. Aufgrund einer unpräzisen Geometrie konnte bei der Implementierung der CAD-STEP-Dateien zu Beginn der FEM-Modellierung die Netzstruktur nicht erstellt werden. Nach der zeitintensiven Reparatur des FEM-Modells in ABAQUS konnte das Modell letztendlich erstellt werden. Anschließend konnte die FEM-Berechnung durchgeführt werden. Die adaptive Netzverfeinerung wurde nicht direkt am Bauteil selbst vorgenommen. Stattdessen wurden Teilausschnitte des jeweiligen Haupt- bzw. Halterings als neues Bauteil verwendet. Eine Festigkeitsanalyse wird aufgrund der Überdimensionierung beider Bauteile vernachlässigt.

4 Beschaffung und Fertigung

Nach erfolgreichem Abschluss des CAD-basierten Optimierungsprozesses wurden die technischen Zeichnungen für die Fertigung der Fertigungsteile abgeleitet und der Kauf von Norm- und Kaufteilen endgültig eingeleitet. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von Feinmechanik-Werkstätten zur Fertigung der Bauteile und einer beachtlichen Lieferzeit von mindestens acht Wochen musste der Zeitplan für die Testdurchführung im Rahmen dieser Arbeit verkürzt werden. Zusätzlich zu den langen Lieferzeiten des Fertigers hat sich beim Zerspanen des oberen Trennrohrs die Zulieferung wegen eines Betriebsfehlers um weitere vier Wochen verspätet. Nach Erhalt der jeweiligen Fertigungsteile wurde eine Wareneingangskontrolle durchgeführt.

4.1 Fertigung von Fertigungsteilen

Die Fertigungsteile sind in Tabelle 4-1 inklusive Massen aufgelistet. Aufgrund der langen Fertigungszeiten aller Bauteile konnten nicht alle Teile rechtzeitig gefertigt werden. In der Spalte Status gibt das Häkchen den Fertigungsstatus des entsprechenden Bauteils an. Demnach sind die aufgelisteten Massen je nach Fertigungsstatus tatsächlich gewogen bzw. mit Hilfe des CAD-Modells berechnet.

| Fertigungsteile | | | | | | | |
|-----------------|-----|-------------------------------|-----------|-----------|-----------------|--------------|--|
| | Nr. | Bauteilbezeichnung | Stückzahl | Masse [g] | Gesamtmasse [g] | Status | |
| F | 1 | Oberes Trennrohr | 1 | 2895,0 | 2895,0 | \checkmark | |
| 0 | 2 | Service Fenster Elektronik | 1 | 20,1 | 20,1 | \checkmark | |
| | 3 | Hauptring | 1 | 1591,5 | 1591,5 | \checkmark | |
| | 4 | Haltering | 1 | 899,8 | 899,8 | \checkmark | |
| anik | 5 | Klammer | 8 | 122,2 | 977,9 | \checkmark | |
| cha | 6 | Klammerhalterung | 8 | 46,6 | 372,5 | \checkmark | |
| me | 7 | Scharnier | 8 | 39,2 | 313,5 | \checkmark | |
| ngs | 8 | Scharnierhalterung | 8 | 10,1 | 80,8 | \checkmark | |
| ทนเ | 9 | Distanzmuffe | 6 | 6,2 | 37,2 | \checkmark | |
| rer | 10 | Haltescheibe | 2 | 10,2 | 20,4 | \checkmark | |
| | 11 | Bronzestab | 4 | 63,4 | 253,4 | \checkmark | |
| | 12 | Linearführungsadapter | 4 | 48,3 | 193,2 | X | |
| | 13 | Backe | 8 | 109,1 | 872,8 | \checkmark | |
| heit | 14 | Obere Gasdruckfederhalterung | 4 | 45,0 | 180,0 | X | |
| einl | 15 | Untere Gasdruckfederhalterung | 4 | 109,0 | 436,0 | X | |
| nns | 16 | Obere Gasdrucktankhalterung | 2 | 166,5 | 333,0 | X | |
| Tre | 17 | Untere Gasdrucktankhalterung | 2 | 177,6 | 355,2 | X | |
| ere | 18 | Kupplungshalterung | 2 | 89,7 | 179,4 | X | |
| Jnt | 19 | Service Fenster Pneumatik | 2 | 44,8 | 89,6 | X | |
| | 20 | Unteres Trennrohr | 1 | 7069,0 | 7069,0 | X | |

Tabelle 4-1: Fertigungsteile

4.1.1 Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile

Es wurden alle Fertigungsteile einer Wareneingangskontrolle unterzogen, sie beinhaltet eine Sicht-, Maß- und Gewichtskontrolle. Nachstehend in Tabelle 4-2 sind alle Fertigungsteile mit Foto und gemessenem Gewicht aufgelistet. Die folgenden Abbildungen in Tabelle 4-2 wurden nicht maßstabsgetreu erstellt, sie wurden der entsprechenden Tabellengröße für eine bessere Sichtbarkeit angepasst.

| Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile | | | | |
|--------------------------------------------|--------------------|------------------|--|--|
| Bauteil | überprüfung | Bauteilabbildung | | |
| Bezeichnung: | Backe | | | |
| Anhang: | 15 | | | |
| Stückzahl: | 8 | | | |
| Sichtkontrolle: | \checkmark | | | |
| Maßprüfung: | \checkmark | | | |
| Gewicht: | 109,1 g | | | |
| Bezeichnung: | Klammer | | | |
| Anhang: | 7 | | | |
| Stückzahl: | 8 | | | |
| Sichtkontrolle: | \checkmark | | | |
| Maßprüfung: | \checkmark | | | |
| Gewicht: | 122,2 g | | | |
| Bezeichnung: | Klammerhalterung | | | |
| Anhang: | 6 | | | |
| Stückzahl: | 8 | | | |
| Sichtkontrolle: | \checkmark | | | |
| Maßprüfung: | \checkmark | | | |
| Gewicht: | 46,6 g | | | |
| Bezeichnung: | Scharnierhalterung | | | |
| Anhang: | 10 | | | |
| Stückzahl: | 8 | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | | | |
| Maßprüfung: | \checkmark | | | |
| Gewicht: | 10,1 g | | | |

Tabelle 4-2: Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile

| Fortsetzung: Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile | | | | | |
|---------------------------------------------------------|--------------|--------------------|--|--|--|
| Bauteilü | berprüfung | Bauteilabbildung | | | |
| Bezeichnung: | Scharnier | | | | |
| Anhang: | 8 | | | | |
| Stückzahl: | 8 | | | | |
| Sichtkontrolle: | \checkmark | | | | |
| Maßprüfung: | ✓ | | | | |
| Gewicht: | 39,2 g | | | | |
| Bezeichnung: | Haltering | | | | |
| Anhang: | 9 | | | | |
| Stückzahl: | 1 | | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | | | | |
| Maßprüfung: | ✓ | 0 10 00 0 00 00 00 | | | |
| Gewicht: | 899,8 g | | | | |
| Bezeichnung: | Distanzmuffe | | | | |
| Anhang: | 11 | | | | |
| Stückzahl: | 6 | | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | | | | |
| Maßprüfung: | ✓ | | | | |
| Gewicht: | 6,2 g | | | | |
| Bezeichnung: | Haltescheibe | | | | |
| Anhang: | 12 | | | | |
| Stückzahl: | 2 | | | | |
| Sichtkontrolle: | \checkmark | | | | |
| Maßprüfung: | ✓ | | | | |
| Gewicht: | 10,2 g | | | | |
| Bezeichnung: | Bronzestab | | | | |
| Anhang: | 13 | | | | |
| Stückzahl: | 2 | | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | | | | |
| Maßprüfung: | \checkmark | | | | |
| Gewicht: | 63,4 g | | | | |

Tabelle 4-2: Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile

| Fortsetzung: Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile | | | | |
|---------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------|--|
| Baute | ilüberprüfung | Bauteilal | bbildung | |
| Bezeichnung: | Hauptring | | | |
| Anhang: | 5 | | | |
| Stückzahl: | 1 | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | 65 V.a | | |
| Maßprüfung: | ✓ | | | |
| Gewicht: | 1591,5 g | | | |
| Bezeichnung: | Service Fenster Elektr. | | | |
| Anhang: | 21 | | | |
| Stückzahl: | 1 | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | | | |
| Maßprüfung: | ✓ | | | |
| Gewicht: | 20,1 g | | | |
| Bezeichnung: | Oberes Trennrohr | | | |
| Anhang: | 23 | | | |
| Stückzahl: | 1 | | | |
| Sichtkontrolle: | ✓ | | | |
| Maßprüfung: | \checkmark | | | |
| Gewicht: | 2895,0 g | · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | | |

Tabelle 4-2: Wareneingangskontrolle der Fertigungsteile

Die Wareneingangskontrolle für die gelieferten Bauteile konnte erfolgreich abgeschlossen werden, eine endgültige Überprüfung des Trennungssystems wird mit Abschluss des vollständigen Zusammenbaus erwartet.

4.1.2 Betriebsfehler beim Fertigen

Wie bereits erwähnt gab es während der Fertigung des oberen Trennrohrs einen Betriebsfehler. Aufgrund eines Betriebsfehlers während der Fertigung kam es zu Verzögerungen im Fertigungsablauf. Dabei wurde die weitere Fertigung des unteren Trennrohrs und der Testablauf während der Testphase nachhaltig eingeschränkt. Für die Erstellung des oberen Trennrohrs wurde ein Aluminiumrohr mit den Abmessungen 332 mm x 300 mm x 200 mm (D_a x D_i x L) als Vormaterial bestellt. Während der spanenden Bearbeitung des Außendurchmessers wurde laut Angaben des Herstellers der Rohling in der CNC-Fräsmaschine falsch eingespannt. Die hohen Kräfte des Fräskopfes haben die einspannende Halterung verformt, sodass dabei der Rohling mit der Halterung aus der Einspannung herausgeschleudert wurde. Bei diesem Betriebsunfall kam es glücklicher Weise nur zu Sachschaden. Das Vormaterial wurde irreversibel beschädigt und konnte für die weitere Fertigung nicht weiter genutzt werden. Dadurch kam es zu der genannten Verzögerung bei der Integrationsphase und des Betriebsablaufs der Testphase. Des Weiteren erwies sich die Fertigung des unteren Trennrohrs unter der Berücksichtigung etwaiger Veränderungen der Schnittstelle zu den acht Backen über das Trennungssystem als nicht wirtschaftlich. Es wurde beschlossen die Fertigung des unteren Trennrohrs und die restlichen Fertigungsteile der unteren Trennungseinheit vorerst auszusetzen, um Fertigungsungenauigkeiten mit Anpassen der Fertigungstoleranzen des unteren Trennrohrs ausgleichen zu können. Dabei soll die Möglichkeit generiert werden den Fertigungsprozess parallel nach Vermessung des Gesamtsystems im geschlossenem Zustand anzugleichen, um das Spaltmaß zwischen den tragenden Elementen des Trennungseinheit aus Tabelle 4-1 werden parallel mit der Fertigung des unteren Trennrohrs begonnen.



Abb. 4.1: Unterkante des oberen Trennrohrs

Abb. 4.2: Oberseite des oberen Trennrohrs

Auf Abb. 4.1 ist die Unterkante des Rohlings für die Fertigung des oberen Trennrohrs zu sehen, es ist deutlich zu erkennen, dass die Außenwand durch die Kraftaufnahme des Fräskopfes verbogen wurde. Die Spuren des Fräskopfes haben dabei deutliche Riefen an der Außenseite hinterlassen. In der rechten Abb. 4.2 ist die Oberkante des Rohlings zu sehen, auf der das Vormaterial durch die falsche Einspannung beim Herausschleudern ebenfalls beschädigt wurde.

Durch den Betriebsunfall verzögerte sich die Fertigstellung des oberen Trennrohrs um vier Wochen. Aufgrund des Betriebsunfalls und der Entscheidung das untere Trennrohr nicht zu fertigen musste der Testablauf hinsichtlich des Aufbaus und der Durchführung sowohl zeitlich als auch technisch angepasst werden. Wie ursprünglich geplant ist ein vollständiges Testen des Trennungssystems aufgrund des fehlenden unteren Trennrohrs nicht möglich. Da die acht Bronzebacken zusammen mit den acht Klammern der Trennungsmechanik für das Verklemmen der oberen und der unteren Trennungseinheit sorgen.

4.2 Beschaffung von Kaufteilen

In der nachfolgenden Tabelle 4-3 sind alle Kaufteile inklusive der Massen aufgelistet. Die Einträge in der Statusspalte (St.) gibt den Stand der Warenannahme und den erfolgreichen Zusammenbau an.

| Kaufteile | | | | | | |
|-----------|-----|--------------------------|-----------|-----------|-----------------|--------------|
| | Nr. | Bauteilbezeichnung | Stückzahl | Masse [g] | Gesamtmasse [g] | St. |
| Е | 1 | Hülsenmutter M3 | 36 | 0,6 | 20,2 | \checkmark |
| 0 | 3 | Unterlegscheibe 3,2 | 36 | 0,1 | 3,6 | ~ |
| 5 | 2 | Elektrischer Linearmotor | 2 | 401,7 | 803,4 | \checkmark |
| F | 3 | Führungsschiene | 4 | 204,0 | 816,0 | ~ |
| neit | 4 | Führungswagen | 4 | 172,1 | 688,4 | \checkmark |
| | 5 | Gasdruckfeder | 4 | 238,0 | 952,0 | \checkmark |
| | 6 | Gasdrucktank | 2 | 543,0 | 1086,0 | > |
| einl | 7 | Rückschlagventil | 2 | 24,0 | 48,0 | \checkmark |
| ŭu | 8 | T-Stück | 2 | 27,0 | 54,0 | \checkmark |
| Tre | 9 | L-Stück | 2 | 22,0 | 44,0 | \checkmark |
| ere | 10 | Stecker | 2 | 13,6 | 27,2 | \checkmark |
| Jnte | 11 | Kupplungsdose | 2 | 93,3 | 186,6 | √ |
| | 12 | Dichtring | 10 | 0,3 | 3,2 | \checkmark |
| | 13 | PET-Schlauch | 1 | 0,037/mm | 40,6 | \checkmark |

Tabelle 4-3: Kaufteile

[OT - Obere Trennungseinheit; TM - Trennungsmechanik; UT - Trennungseinheit]

4.3 Beschaffung von Normteilen

Die nachstehende Tabelle 4-4 zeigt die verwendeten Normteile inklusive der Massen. Wie in Kapitel 4.2 gibt das Häkchen den Wareneingang und den erfolgreichen Zusammenbau an.

| Normteile | | | | | | |
|------------|-----|------------------------------|-----------|-----------|------------|--------------|
| | Nr. | Bauteilbezeichnung | Stückzahl | Masse [g] | Gesamt [g] | St. |
| Ē | 1 | Innensechskantschraube M3x6 | 36 | 0,4 | 13,2 | \checkmark |
| Õ | 2 | Innensechskantschraube M3x8 | 4 | 0,5 | 2,0 | \checkmark |
| inneinheit | 3 | Innensechskantschraube M6x20 | 32 | 5,5 | 177,3 | \checkmark |
| | 4 | Innensechskantschraube M5x18 | 16 | 3,9 | 62,1 | \checkmark |
| | 5 | Edelstahlwelle | 24 | 6,8 | 162,8 | \checkmark |
| | 6 | Gleitbuchse 12 mm | 8 | 5,2 | 41,6 | \checkmark |
| | 7 | Gleitbuchse 10 mm | 16 | 4,3 | 69,0 | \checkmark |
| | 8 | Sicherheitsmutter M4 | 48 | 0,9 | 41,2 | \checkmark |
| | 9 | Unterlegscheibe 4,3 | 96 | 0,2 | 22,1 | \checkmark |
| | 10 | Innensechskantschraube M3x8 | 32 | 0,5 | 14,8 | \checkmark |
| | 11 | Innensechskantschraube M6x12 | 4 | 4,9 | 19,6 | ~ |
| | 12 | Innensechskantschraube M3x60 | 8 | 3,4 | 27,0 | ~ |
| Tre | 13 | Innensechskantschraube M3x10 | 24 | 0,9 | 20,4 | \checkmark |
| ere | 14 | Innensechskantschraube M4x12 | 2 | 1,3 | 2,6 | ~ |
| Inte | 15 | Innensechskantschraube M4x15 | 24 | 1,8 | 43,4 | \checkmark |
| | 16 | Unterlegscheibe 4,3 | 24 | 2,0 | 48,0 | \checkmark |
| | 17 | Sicherheitsmutter M4 | 24 | 0,6 | 15,1 | \checkmark |
| | 18 | Innensechskantschraube M5x20 | 12 | 5,0 | 60,1 | \checkmark |
| | 19 | Sicherheitsmutter M5 | 12 | 0,6 | 6,7 | \checkmark |
| | 20 | Innensechskantschraube M3 | 16 | 0,8 | 12,0 | \checkmark |
| | 21 | Innensechskantschraube M3x60 | 8 | 3,4 | 27,0 | \checkmark |
| | 22 | Innensechskantschraube M3x10 | 24 | 0,9 | 20,4 | \checkmark |
| | 23 | Sicherheitsmutter M8 | 8 | 2,0 | 15,6 | \checkmark |
| | 24 | Unterlegscheibe 8,4 | 8 | 1,8 | 14,7 | \checkmark |
| | 25 | Innensechskantschraube M8x22 | 8 | 10,6 | 84,9 | \checkmark |
| Jeit | 26 | Innensechskantschraube M3x6 | 16 | 0,4 | 6,4 | \checkmark |
| einł | 27 | Innensechskantschraube M4x12 | 16 | 1,5 | 24,0 | \checkmark |
| ßse | 28 | Innensechskantschraube M6x15 | 8 | 4,4 | 35,2 | \checkmark |
| nur | 29 | Innensechskantschraube M5x12 | 16 | 2,5 | 40,0 | \checkmark |
| eni | 30 | Innensechskantschraube M6x15 | 20 | 4,4 | 88,0 | \checkmark |
| tere Tr | 31 | Innensechskantschraube M6x20 | 4 | 5,5 | 22,0 | \checkmark |
| | 32 | Innensechskantschraube M6x12 | 2 | 3,8 | 7,6 | \checkmark |
| Un | 33 | Innensechskantschraube M8x50 | 4 | 19,7 | 78,9 | \checkmark |
| | 34 | Unterlegscheibe 8,4 | 8 | 1,8 | 14,7 | \checkmark |
| | 35 | Sicherheitsmutter M8 | 8 | 4,3 | 34,3 | \checkmark |
| | 36 | Sicherheitsmutter M8 | 8 | 2,0 | 15,6 | \checkmark |

Tabelle 4-4: Normteile

[OT - Obere Trennungseinheit; TM - Trennungsmechanik; UT - Trennungseinheit]

5 Montage, Integration und Test

Nach Erhalt der Fertigungs-, Kauf- und Normteile wurde die obere Trennungseinheit und die Trennungsmechanik erfolgreich zusammengebaut. Aufgrund des fehlenden unteren Trennrohrs konnte die untere Trennungseinheit nicht fertiggestellt werden. Für die Integration der Gasdruckfedern und -tanks wurde ersatzweise ein Testzylinder aufgebaut. Die Bauteile wurden zuerst auf Subsystemebene zusammengebaut und anschließend auf Systemebene montagegerecht integriert. Anschließend erfolgten die Testdurchführungen der jeweiligen Trennungseinheiten.

5.1 Montage auf Komponentenebene

Im Folgenden werden das Zusammenfügen bzw. Zusammenbauen vereinzelter Unterbaugruppen vorgestellt, dabei werden nur die wichtigsten Montagesätze aufgeführt. Auf die Darstellung der restlichen Montagegruppen wird an dieser Stelle aufgrund des Umfangs verzichtet. Die technischen Fertigungszeichnungen der Fertigungsbauteile und Baugruppen können hierfür im Anhang eingesehen werden.

5.1.1 Zusammenfügen der Bronzegleitlager für die Lagerung der Edelstahlwellen

Aufgrund der bereits erwogenen Gefahr der Kaltverschweißung zwischen den beweglichen Elementen der Trennungsmechanik wurden an den entsprechenden Reibstellen die Materialpaarung Bronze auf Stahl verwendet. Die Edelstahlwellen bilden die Achsen eines Klemmstrangs, der in Abb. 5.5 veranschaulicht ist. Die drei Edelstahlwellen werden jeweils über die Klammerhalterung, das Scharnier und die Scharnierhalterung gelagert. Dementsprechend wurden für die Vermeidung der Kaltverschweißung die Bronzegleitlager einmal in die Klammerhalterung und zweimal in das Scharnier eingepresst, sowie in Abb. 5.1 und Abb. 5.2 zu sehen ist.



Abb. 5.1: KH - GL

Abb. 5.2: Scharnier - GL

Abb. 5.3: Klammer

Abb. 5.4: SH

Abb. 5.5: Klemmstrang

In der rechten Abbildung ist der viergliedrige Klemmstrang zu sehen, welcher aus der Klammerhalterung, der Klammer, dem Scharnier und der Scharnierhalterung besteht. Die Klammer und die Scharnierhalterung sind nochmals zur besseren Darstellung auf Abb. 5.3 bzw. Abb. 5.4 veranschaulicht. Die Glieder eines Stranges sind jeweils über drei Ø 6 mm starke Edelstahlwellen mit beidseitigem Gewinde verbunden. Die Gewindeenden der Edelstahlwellen sind mit sechs M4 Sicherheitsmuttern angezogen und sorgen für eine schwimmende Lagerung.

5.1.2 Zusammenbau der Klemmmechanik

Vor Zusammenbau der Unterbaugruppen, mussten die Achsausrichtungen der Klammerhalterungen ausgemessen und symmetrisch zu einander eingestellt werden. In der folgenden Abb. 5.6 ist der dafür vormontierte Hauptring mit den acht Klammerhalterungen abgebildet.



Abb. 5.6: Vermessung der Achsen

Abb. 5.7: Haltering mit 8 Klemmsträngen

Die acht Stränge auf Abb. 5.7 der Trennungsmechanik wurden der Integrationsreihenfolge entsprechend zusammengebaut und mit dem Haltering verbunden. Um anschließend zur oberen Trennungseinheit zusammen mit dem Hauptring und dem oberen Trennrohr zusammengefügt zu werden.

5.1.3 Zusammenbau der oberen Trennungseinheit

Nachdem Vermessen der Achsausrichtung konnten die Unterbaugruppen nach der Integrationsreihenfolge weiter erstellt werden. In der folgenden Abb. 5.8 sind das obere Trennrohr und der Hauptring abgebildet, sie sind über 32 radiale M6 Schraubverbindungen verbunden. Auf Abb. 5.9 ist der obere Teil des Trennmechanismus mit vier Klammern zu sehen. Der Teilaufbau ist im Gegensatz zu den CAD-Modelldarstellungen verkehrtherum aufgebaut, um die vertikale Aufwärtsbewegung des Halterings in geeigneter Weise zu beobachten. In diesem Testaufbau wurde eine Bewegungsanalyse zur Optimierung des Spaltmaßes zwischen den einzelnen Gliedern der Klemmmechanik unternommen. Außerdem ermöglicht die verkehrte Testanordnung der oberen Trennungseinheit eine Vereinfachung der Integration und der Testdurchführung, sodass auf den folgenden Kapiteln das Trennungssystem verkehrtherum abgebildet wird. Die Überprüfung der Kinematik des Trennungssystems soll eine exakte vertikale Auf- und Abwärtsbewegung des Halterings gewährleisten.



Abb. 5.8: Oberes Trennrohr und Haltering

Abb. 5.9: Überprüfung der Kinematik

Das System erfordert für einen genauen Funktionsablauf mit möglichst geringem Spiel und ein präzises Einstellen des Spaltmaßes zwischen den Klemmgliedern. Die kinematischen Anforderungen an das Trennungssystem konnten erfolgreich überprüft werden. Die Auf- und Abwärtsbewegungen des Halterings konnten wie beabsichtigt durchgeführt werden. Im aktuellen Design beträgt der Spalt auf jeweils einer Seite 0,5 mm, welcher durch das Hinzufügen von geeigneten Passscheiben auf 0,1 mm reduziert werden kann.

5.2 Integration auf Systemebene

Nach Fertigstellung der Unterbaugruppen und Vorbereitung der Subsysteme wurden die obere Trennungseinheit und der untere Testzylinder fertiggestellt. Auf den folgenden Darstellungen sind die wesentlichen Integrationsschritte aufgeführt und verdeutlichen den Aufbau der oberen Trennungseinheit.

5.2.1 Vorstellung der oberen Trennungseinheit

Der Zusammenbau der oberen Trennungseinheit erfolgte montagegerecht in dem die Unterbaugruppen bzw. Subsysteme auf den folgenden Abb. 5.10, Abb. 5.11 und Abb. 5.12 zusammengefügt wurden. Aufgrund der hohen allgemein vorgegebenen Fertigungstoleranz von 0,05 mm nach DIN EN ISO 2768 (fein) wurden die Fertigungsteile maßgebend gefertigt. Durch das Beachten der Toleranzkette während der Konstruktion konnte die obere Trennungseinheit ohne Nachbesserungen montiert werden.



Abb. 5.10: Integrationsschritt I







Abb. 5.12: Integrationsschritt III

In der nachstehenden Abb. 5.13 ist die Fertigstellung des Zusammenbaus der oberen Trennungseinheit dargestellt. Die gewogene Masse der gesamten oberen Trennungseinheit beträgt 19.467,7 Gramm. Es wurden alle testbedingten Voruntersuchungen zur Funktion der Elektronik und Kinematik durchgeführt, sodass die obere Trennungseinheit für die Testdurchführung auf Sub- und Systemebene freigegeben wird.



Abb. 5.13: Obere Trennungseinheit

5.2.2 Vorstellung des unteren Testzylinders

Damit ein Abstoßtest der oberen Trennungseinheit durchgeführt werden kann, wurde ersatzweise ein funktionsgerechter Testzylinder entwickelt. Der untere Testzylinder auf Abb. 5.14 soll sowohl die Integration der pneumatischen Subsysteme als auch die Bereitstellung der angesetzten Beschleunigungskräfte der vier Gasdruckfedern demonstrieren.



Abb. 5.14: Testzylinder



Abb. 5.15: Pneumatisches System

Das pneumatische System konnte zusammen mit den Gasdruckfedern erfolgreich integriert und erwartungsgerecht in Einsatz gebracht werden, sowie auf Abb. 5.15 zu sehen ist. Die Gaskolben wurden im ausgefahrenem Zustand vermessen, um sie vertikal und symmetrisch zueinander ausrichten zu können.

5.3 Tests auf Subsystemebene

Nach der Montage der Bauteile bzw. Unterbaugruppen und erfolgreicher Integration der Subsysteme wurden die obere und die untere Trennungseinheit separat getestet. Für die untere Trennungseinheit wurde, wie bereits erwähnt, ein Testzylinder verwendet, der einen eingeschränkten Test auf Systemebene ermöglichen soll.

5.3.1 Ausfahrtest der oberen Trennungseinheit

Die obere Trennungseinheit wurde entsprechend den technischen Zeichnungen im Anhang zusammengebaut und getestet. Für den folgenden Test wurde das System für eine vereinfachte Testdurchführung auf die Oberkante gestellt. Die Abbildungen Abb. 5.16, Abb. 5.17 und Abb. 5.18 stellen eine Momentaufnahme mit Zeitangabe dar und dienen zur Veranschaulichung der vertikalen Aufwärtsbewegung des Halterings. Durch die Aufwärtsbewegung werden die acht Klemmen wie vorgesehen in die zu schließende Position gebracht.



Abb. 5.16: Ausfahrtest - 0 Sekunden





Abb. 5.17: Ausfahrtest - 9 Sekunden



Abb. 5.18: Ausfahrtest - 18 Sekunden

Die obigen Momentaufnahmen zeigen das vollständige Ausfahren der elektrischen Linearmotoren. Die Gesamtzeit des Ausfahrens beträgt 18 Sekunden. Des Weiteren wurden die Ausfahrtests auch in verschieden Ausrichtungen zum Erdboden ausgeführt, um eine richtungsunabhängige Funktion des Trennungsmechanismus zu demonstrieren. Resultierend aus den einwandfrei funktionierenden Testdurchführungen kann der Nachweis somit für die Funktionstüchtigkeit des Trennungssystems hinsichtlich der vorgegebenen kinematischen Anforderungen erfüllt werden.

5.3.2 Ausfahrtest der unteren Trennungseinheit

Angesichts der Innenabmessungen des Testzylinders war eine Befestigung der acht Backen nicht möglich. In den folgenden Abbildungen Abb. 5.19, Abb. 5.20 und Abb. 5.21 sind die Momentaufnahmen des Ausfahrtests der Gasdruckfedern aufgeführt. Die vier symmetrisch angeordneten Gasdruckfedern wurden mit einem Betriebsdruck von 8 Bar über die zwei gegenüber liegenden Gasdrucktanks beaufschlagt.



Abb. 5.19: Ausfahrtest - 0 Sekunden

Abb. 5.20: Ausfahrtest - 0,1 Sekunden

Abb. 5.21: Ausfahrtest - 0,2 Sekunden

Die dargestellten Momentaufnahmen zeigen das vollständige Ausfahren der vier Federkolben nachdem sie durch die zwei Gasdrucktanks mit einem Tankinhalt von jeweils 0,4 Liter bedrückt wurden. Dabei beträgt die gemessene Ausfahrzeit der Federkolben 0,2 Sekunden. Das pneumatische System konnte mit diesem Test ebenfalls überprüft und hinsichtlich der Funktionalität der pneumatischen Verbindungselemente getestet werden.

5.4 Tests auf Systemebene

Nach Abschluss der Tests auf Subsystemebene wird an dieser Stelle aufgrund des fehlenden unteren Trennrohrs ein eingeschränkter Trennungstest durchgeführt. Dabei ist, wie bereits erwähnt, der endgültige Test mit selbstständiger Verklemmung des Trennungssystems durch die fehlenden Bronzebacken nicht durchführbar. Die obere Trennungseinheit wird durch die Gasdruckfedern des Testzylinders horizontal auf einem Prüfstand beschleunigt. Der horizontale Beschleunigungstest der oberen Trennungseinheit wurde in einer externen Einrichtung durchgeführt. Auf den Abbildungen Abb. 5.22, Abb. 5.23 und Abb. 5.24 sind die dazugehörigen Darstellungen des Testaufbaus erkennbar.



Abb. 5.22: Positionierung

Abb. 5.23: Ausrichtung

Abb. 5.24: Befestigung

Die genaue Positionierung des unteren Testzylinders am Teststand musste bei dem Aufbau exakt eingestellt werden. Damit die Federkolben der Gasfedern die beschleunigende Federkraft jeweils mittig an den vier Bronzestäben einleiten können. Nachdem der Testaufbau abgeschlossen wurde konnten die ersten Tests durchgeführt werden. Dabei erfolgte die Bedrückung ebenfalls mit einem Betriebsdruck von 8 Bar. Aufgrund fehlender Adaptereinstellungen wurde der Druck im Horizontalprüfstand direkt durch den angeschlossenen Kompressor mit einem Tankvolumen von 24 Litern beaufschlagt. Aufgrund thermodynamischer Prozesse durch den großen Volumenunterschied hinsichtlich des Tankinhaltes zwischen dem Kompressor und der Gasdruckbehälter sind weitere Untersuchungen mit direkter Druckbeaufschlagung durch die vorgesehenen Gasdrucktanks zu empfehlen.



Abb. 5.25: Beschleunigungstest I



Abb. 5.26: Beschleunigungstest II



Abb. 5.27: Beschleunigungstest III

Die oben dargestellten Abbildungen auf Abb. 5.25, Abb. 5.26 und Abb. 5.27 zeigen den Trennungsverlauf eines Beschleunigungstests. Über einen Geschwindigkeitssensor wird die Geschwindigkeit unmittelbar nach der Trennung beider Systeme gemessen. Die obere Trennungseinheit konnte mit Hilfe des Kompressors auf 2,11 $\frac{m}{s}$ beschleunigt werden und entspricht somit der geforderten Mindestgeschwindigkeit von 2 $\frac{m}{s}$ aus der unternehmensseitig gestellten Anforderung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird der Entwicklungsverlauf für die Erstellung des optimierten Testmodells dokumentiert. Die Aufgabe bestand darin, ein vorhandenes Konzept zu optimieren, um es nach Fertigstellung zu testen. Rückblickend war die Optimierungsphase mit der CAD-basierten Optimierung in Kapitel 2 eine sehr arbeitsintensive Aufgabe. Vor allem die Entwicklungs- und Konstruktionsphase stellten eine große Herausforderung dar. Daher blieben keine Optimierungsmöglichkeiten, das Trennungssystem bezüglich der Testauswertungen detaillierter zu analysieren. Zumal das aktuelle System ohne die Fertigstellung des unteren Trennrohrs vorerst die geplante Testdurchführung eines autonom funktionierenden Separationssystems nicht demonstrieren kann. Weil die Fertigung des oberen Trennrohrs zu Verzögerungen und Veränderungen des Produktionsablaufs geführt hat, wird die endgültige Testmodellerstellung mit autonomer Klemmmechanik und direkter Druckbeaufschlagung durch eigene Drucktanks zeitlich verschoben.

6.1 Zusammenfassung

Zusammenfasend war die CAD- und FEM-basierte Optimierung zur Erstellung eines Trennungsmechanismus eine anspruchsvolle Aufgabe. Die geforderten Arbeitspakete konnten im Rahmen der Aufgabenstellung im Wesentlichen umgesetzt werden. Bis auf die Testdurchführung eines autarken Trennungssystems mit dem unteren Trennrohr wurden sämtliche Inhalte der Arbeitspakete abgearbeitet und dokumentiert. Die Vielseitigkeit dieses Projekts entstand durch die Anforderungen im Bereich der Luft- und Raumfahrt. Des Weiteren konnte der Entwurf mit Hilfe der FEM bezüglich der Verformung des Haupt- und Halterings analysiert und mit der Auswertung der Ergebnisse in Kapitel 3.8 validiert werden. Folglich besteht die Möglichkeit, das Gewicht des Hauptrings durch Verringerung der Wandstärke und das Gewicht des Halterings durch eine neue Materialzuweisung zu reduzieren. Nach Fertigstellung des Trennungssystems wurden die Arbeiten, trotz eingeschränkter Testdurchführung, erfolgreich abgeschlossen. Die obere Trenneinheit konnte mit dem pneumatischen System auf eine Geschwindigkeit von 2,11 m/ beschleunigt werden. Dabei wurde die Entwicklungsphase vollständig ausgeführt. Die Testphase konnte dagegen wegen der fehlenden unteren Trennungseinheit nur zum Teil ausgeführt werden. Weitere Tests zur Verifizierung der Tauglichkeit des Trennungssystems sind eingeplant. Entsprechend des Verwendungszwecks muss das System für die Umgebungsbedingungen des Einsatzortes verifiziert werden. Daher wird in der weiteren Produktentwicklung das Trennungssystem extern einem Vibrationstest zur Überprüfung von Erschütterungen und einem Vakuumtest zur Überprüfung der Weltraumtauglichkeit unterzogen.

Die Testphase konnte im Rahmen des Zeitplans hinsichtlich der Optimierungsmöglichkeiten nicht weiter vertieft werden. Der theoretisch mögliche Abstoßtest konnte wegen der fehlenden Verklemmung der Backen und der Klemmmechanik nicht durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass durch die Bereitstellung des Drucks ohne Verklemmung keine hohe Wirkung erzielt werden kann. Beim endgültig durchzuführenden Abstoßtest mit Verklemmung wird aufgrund der betriebsbedingten Bedrückung der Gasdruckfedern eine unverzügliche Energieabgabe erfolgen. Dadurch wird im Gegensatz zu dem eingeschränkten Test in Kapitel 5.4 eine höhere Geschwindigkeitsmessung erwartet. Diese Diplomarbeit wurde mit bewährten Technologien aus der Luft- und Raumfahrt hinsichtlich der Optimierung des vorentworfenen Systems zu Ende geführt.

6.2 Ausblick

Die Weiterentwicklung des Trennungssystems stellte eine große technische Herausforderung dar, angefangen von der Untersuchung des bestehenden Entwurfs bis hin zur Testphase. Im Vorentwurf wurden nicht alle Anforderungen umgesetzt. Sie wurden nachträglich im Optimierungsprozess berücksichtigt. Dabei wurden technische Probleme festgestellt, die bei der Weiterentwicklung gelöst werden konnten. Im Folgenden werden weitere Optimierungsmöglichkeiten aufgelistet, die im Zusammenhang mit dieser Entwicklungsphase aufgetreten sind:

Fertigstellung der unteren Trennungseinheit:

Im nächsten Schritt muss das untere Trennrohr fertiggestellt werden, um die untere Trennungseinheit zusammenstellen zu können. Des Weiteren müssen die ausstehenden Fertigungsteile in Tabelle 4-1 gefertigt werden, um die Subsysteme vollständig integrieren zu können. Das betrifft im Wesentlichen die Befestigungselemente der Gasdruckfedern bzw. der Gasdrucktanks, der Führungsschienen und der pneumatischen Anschlussstellen. Die technischen Fertigungszeichnungen sind dem Anhang mit entsprechender Nummerierung und Bezeichnung zu entnehmen. Mit der Fertigstellung des unteren Trennrohrs kann ein anforderungsgerechter Test durch die Befestigung der Backen durchgeführt werden. Dabei kann die Testphase zur Produktentwicklung durch den Nachweis der verlangten Anforderungen abgeschlossen werden.

Überprüfung der Pneumatik:

Das pneumatische System der unteren Trennungseinheit muss mit in einer zusätzlichen Testdurchführung überprüft werden. Anlehnend an die Empfehlung in Kapitel 5.4 müssen die vorgesehenen zwei Gasdrucktanks hinsichtlich der Energiebereitstellung zum Erreichen der geforderten Ausstoßgeschwindigkeit untersucht werden. Trotz Erreichen der Anforderungen hinsichtlich der Geschwindigkeit wird an dieser Stelle dringend empfohlen die vorausgegangenen Berechnungen für die Auslegung des pneumatischen Systems nochmals unternehmensseitig zu überprüfen. Gegebenenfalls müssten die aktuellen zwei Gastanks mit einem Gesamtvolumen von 0,8 Liter durch größere Gasdruckbehälter ersetzt werden.

Reduzierung der Massen:

Durch weitere FEM-Berechnungen hinsichtlich der Festigkeit der Fertigungsteile bei gegebener Beanspruchung kann die Masse des Testmodells erheblich gesenkt werden. Die Fertigungsteile weisen großes Potential zur Massenreduktion auf und sollten nach erfolgter FEM-Validierung umgestaltet werden. In Anbetracht der Untersuchungen zur Deformationsanalyse mit Hilfe der FEM kann ausgesagt werden, dass die Wandstärke des Hauptrings verringert werden kann und dass das Material des Halterings neu zugewiesen werden sollte. Nach Auswahl einer geeigneten Wandstärke für den Hauptring und einer neuen Legierungsauswahl für den Haltering sollte zusätzlich eine Festigkeitsanalyse der Fertigungsteile durchgeführt werden. An den Verbindungsstellen könnte es aufgrund der abnehmenden Wandstärke zu einer Spannungsüberspitzung kommen, die zum Versagen des Bauteils führen könnte. Daher gilt es im weiteren Validierungsprozess die Spannungszustände zu analysieren, um die Ergebnisse mit den Werten der mechanischen Materialeigenschaften vergleichen zu können.

Externer Vibrationstest:

Im weiteren Verlauf der Testdurchführungen ist es empfehlenswert, das System nach Fertigstellung der unteren Trennungseinheit, mit der selbstständig eine Verklemmung herbeigeführt werden kann, extern einem Vibrationstest zu unterziehen. Wegen der strengen Kontrollvorschriften in der Luft- und Raumfahrt müssen Systeme durch eine Reihe von Tests auf Tauglichkeit überprüft und verifiziert werden. Demnach muss das gesamte Trennungssystem einem dynamisch durchgeführten Vibrationstest unterzogen werden. Die hierfür getroffenen Annahmen von möglichen Kaltverschweißungen der unter Druck stehenden Kontaktflächen beider Einheiten müssen nach vollständiger Fertigstellung des autarken Testmodells überprüft werden. Das Trennungssystem wird als Ganzes getestet und im geschlossenem Zustand mit aktivierter Federung dem Vibrationstest unterzogen.

7 Literaturverzeichnis

 Frey, Philip; Vöglein, Martin; SPL - Swiss Propulsion Laboratory (Hrsg.) (2007): SPL Library (Publications, Papers etc.); unter URL: http://www.spl.ch/old/publication/SPL_Papers/FHBB-Staging-2007.pdf

(Stand: 31.05.2018)

[2] SPL - Swiss Propulsion Laboratory (Hrsg.) (2007): Products & Services; unter URL: http://www.spl.ch/old/media/index.html

(Stand: 31.05.2018)

[3] Thomas, Candrea (NASA) (Hrsg.) (2012): Comercial Space Transportation; unter URL: https://www.nasa.gov/exploration/commercial/crew/spacex-ccdev2-ccicap.html

(Stand: 31.05.2018)

[4] Callister, Wiliam D.; Rethwish, David R. (Hrsg.) (2013): Materialwissenschaften und Werkstofftechnik - Eine Einführung: 1. Aufl.; Weinheim: Wiley-VCH Verlag.

(Seite 829)

[5] Moeller, Elvira (2008): Handbuch Konstruktionswerkstoffe: Auswahl, Eigenschaften, Anwendung: 1. Aufl.; München: Carls Hanser Verlag.

(Seite 240)
8 Anhang

Inhaltsverzeichnis zum Anhang

| Anhang | Überschrift | Seite |
|-----------|--------------------------------------------------|-------|
| Anhang 1 | Baugruppenzeichnung Trennmechanismus Ansicht I | 67 |
| Anhang 2 | Baugruppenzeichnung Trennmechanismus Ansicht II | 68 |
| Anhang 3 | Baugruppenzeichnung Trennmechanismus Ansicht III | 69 |
| Anhang 4 | Stückliste | 70 |
| Anhang 5 | Hauptring | 71 |
| Anhang 6 | Klammerhalterung | 72 |
| Anhang 7 | Klammer | 73 |
| Anhang 8 | Scharnier | 74 |
| Anhang 9 | Haltering | 75 |
| Anhang 10 | Scharnierhalterung | 76 |
| Anhang 11 | Distanzmuffe | 77 |
| Anhang 12 | Haltescheibe | 78 |
| Anhang 13 | Bronzestab | 79 |
| Anhang 14 | Linearführungsadapter | 80 |
| Anhang 15 | Backe | 81 |
| Anhang 16 | Obere Gasdruckfederhalterung | 82 |
| Anhang 17 | Untere Gasdruckfederhalterung | 83 |
| Anhang 18 | Obere Gasdrucktankhalterung | 84 |
| Anhang 19 | Untere Gasdrucktankhalterung | 85 |
| Anhang 20 | Kupplungshalterung | 86 |
| Anhang 21 | Service Fenster Elektronik | 87 |
| Anhang 22 | Service Fenster Pneumatik | 88 |
| Anhang 23 | Oberes Trennrohr | 89 |
| Anhang 24 | Unteres Trennrohr | 90 |



Anhang 1: Baugruppenzeichnung Trennmechanismus Ansicht I



Anhang 2: Baugruppenzeichnung Trennmechanismus Ansicht II



Anhang 3: Baugruppenzeichnung Trennmechanismus Ansicht III

Anhang 4: Stückliste

| Stückliste | | | | |
|------------|----------------------------------|------------------------|-------|--|
| Pos. | Bezeichnung | Beschreibung | Menge | |
| 1 | Hauptring | Fertigungsteil | 1 | |
| 2 | Klammerhalterung | Fertigungsteil | 8 | |
| 3 | Klammer | Fertigungsteil | 8 | |
| 4 | Scharnier | Fertigungsteil | 8 | |
| 5 | Haltering | Fertigungsteil | 1 | |
| 6 | Scharnierhalterung | Fertigungsteil | 8 | |
| 7 | Distanzmuffe | Fertigungsteil | 6 | |
| 8 | Haltescheibe | Fertigungsteil | 2 | |
| 9 | Edelstahlwelle | Ø 6mm - L = 26 mm - M4 | 24 | |
| 10 | Innensechskantschraube - DIN 912 | M5x18 | 16 | |
| 11 | Innensechskantschraube - DIN 912 | M2,5x50 | 8 | |
| 12 | Senkkopfschraube - DIN 7991 | M3x10 | 18 | |
| 13 | Senkkopfschraube - DIN 7991 | M3x12 | 6 | |
| 14 | Senkkopfschraube - DIN 7991 | M3x6 | 32 | |
| 15 | Senkkopfschraube - DIN 7991 | M6x10 | 2 | |
| 16 | Kabeldurchführung | Kaufteil | 2 | |
| 17 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 1 | 2 | |
| 18 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 2 | 2 | |
| 19 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 3 | 2 | |
| 20 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 4 | 2 | |
| 21 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 5 | 2 | |
| 22 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 6 | 2 | |
| 23 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 7 | 2 | |
| 24 | Kreuzschlitzschraube - DIN 7985 | M3x40 | 4 | |
| 25 | Elektrischer Linearmotor | Bauteil 8 | 2 | |
| 26 | Halterung | Fertigungsteil | 4 | |
| 27 | Augenschraube | M8x50 | 4 | |
| 28 | Senkkopfschraube - DIN 7991 | M4x18 | 32 | |
| 29 | Sechskantmutter - DIN 934 | M4 | 32 | |
| 30 | Federring | M8 | 4 | |
| 31 | Unterlegscheibe | M8 | 4 | |
| 32 | Sechskantmutter - DIN 934 | M8 | 4 | |
| 33 | Bronzegleitlager | Ø 6 - L = 10 | 16 | |
| 34 | Bronzegleitlager | Ø 6 - L = 12 | 8 | |
| 35 | Sechskantmutter - DIN 934 | M6 | 24 | |
| 36 | Bronzezylinder | Fertigungsteil | 4 | |
| 37 | Senkkopfschraube - DIN 7991 | M6x13 | 4 | |

Anhang 5: Hauptring



Anhang 6: Klammerhalterung



Anhang 7: Klammer



Anhang 8: Scharnier



Anhang 9: Haltering





Anhang 10: Scharnierhalterung

Anhang 11: Distanzmuffe



Anhang 12: Haltescheibe



Anhang 13: Bronzestab





Anhang 14: Linearführungsadapter

Anhang 15: Backe





Anhang 16: Obere Gasdruckfederhalterung



Anhang 17: Untere Gasdruckfederhalterung



Anhang 18: Obere Gasdrucktankhalterung



Anhang 19: Untere Gasdrucktankhalterung







Anhang 21: Service Fenster Elektronik



Anhang 22: Service Fenster Pneumatik





Anhang 24: Unteres Trennrohr

